



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

METODY PRO DOSAŽENÍ MAXIMÁLNÍHO
VÝKONU FV MODULŮ

METHODS FOR ACHIVEMENT OF MAXIMUM POWER OF PV MODULES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Svrček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství
Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Milan Svrček
Ročník: 2

ID: 106799
Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Metody pro dosažení maximálního výkonu FV modulů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami dosažení maximálního výkonu u fotovoltaických modulů. Z dostupných přístrojů vytvořte měřicí pracoviště pro testování těchto metod. V programu VEE Pro sestavte programy pro dosažení maximálního výkonu FV modulů pomocí zvolených metod. Výsledky měření vzájemně porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Křivák, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji vysokoškolskou kvalifikační práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 25.05.2017

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D, za jeho postřehy, pomoc a celkově za čas vynaložený na vedení mé práce. Dále také děkuji svému vedoucímu v zaměstnání Ing. Davidu Gregorovi, který mi umožnil dojít ve studiu až k diplomové práci a kamarádům, kteří mě podporovali. Děkuji Vám.

V Brně dne 25.05.2017

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá sledováním maximálního bodu účinnosti u fotovoltaických panelů a používanými metodami, jak lze tohoto bodu dosáhnout. Na tomto základu byly navrženy a naprogramovány dvě metody, které byly následně odzkoušeny na třech typech fotovoltaických panelů. V závěru je zhodnocení těchto metod.

KLÍČOVÁ SLOVA: fotovoltaický, bod maximální účinnosti, voltampérová charakteristika.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the tracking of the maximum power point for photovoltaic panels and the methods used to achieve it. On this basis, two methods were designed and programmed and subsequently tested on three types of photovoltaic panels. In conclusion methods were appraised.

KEY WORDS: photovoltaic, Maximum power point, current-voltage characteristic

SVRČEK, M. *Metody pro dosažení maximálního výkonu FV modulů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D..

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	10
Seznam symbolů a zkratk	11
Úvod	12
1 Solární energie.....	13
1.1 Solární energie na Zemi	13
2 Fotovoltaické články	17
2.1 Fotoelektrický jev.....	17
2.2 Funkce fotovoltaického článku	17
2.3 Křemík.....	20
2.4 Vlastnosti a druhy FVČ.....	21
2.5 Vícenásobné struktury	23
2.6 Náhradní obvody fotovoltaického článku	24
2.7 Parametry fotovoltaického článku.....	27
2.7.1 Vliv teploty a osvětlení na FVČ	29
2.7.2 Vliv sériového a paralelního odporu na FVČ.....	31
2.8 Propojení solárních článků	32
2.9 Zastínění panelu	33
2.10 Bypassové diody	35
3 MPPT	37
3.1 MPPT v praxi	39
3.2 PWM vs. MPPT	41
3.3 DC-DC měnič.....	43
3.3.1 Příklad výpočtu střídavosti	46
3.4 Rozdělení metod MPPT	48
3.5 Přímé metody MPPT.....	49
3.5.1 Perturb & Observe method (P&O).....	49
3.5.2 Incremental conductance	51
3.6 Nepřímé metody	54
3.6.1 Fractional Open-Circuit Voltage	54
3.6.2 Fractional Short-Circuit Current	55
3.6.3 Fixed voltage	55
4 Praktická část.....	56

4.1 Fotovoltaické panely	56
4.2 Programování v prostředí HP VEE	58
4.3 Měření V-A charakteristiky panelů	58
4.4 Aplikace metody Perturb and Observe.....	63
4.5 Aplikace metody Incremental Conductance	68
4.6 Simulace změny osvětlení FV panelu	73
4.7 Srovnání metod	75
4.7.1 Monokrystalický panel Rich	77
4.7.2 Polykrystalický panel Conrad	78
4.7.3 Amorfni panel Konarka.....	79
5 Závěr.....	80
Použitá literatura	81

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Dopad sluneční energie na Zemi [3]	14
Obr. 2 Rozdělení slunečního záření	14
Obr. 3 Princip fotoelektrického jevu [4]	18
Obr. 4 Sluneční spektrum po průchodu bezoblačnou atmosférou pod úhlem 48° [5]	20
Obr. 5 Schéma fotovoltaického panelu v řezu [6]	21
Obr. 6 Zobrazení vícepřechodových struktur a jejich účinností [7]	23
Obr. 7 Náhradní jednodiodový obvod pro strukturu fotovoltaického článku, [4]	24
Obr. 8 Náhradní dvoudiodový obvod struktury fotovoltaického článku, [4]	25
Obr. 9 Nákres A-V charakteristiky s vyobrazením MPP [8]	27
Obr. 10 Vliv teploty na FVČ, [3]	30
Obr. 11 V-A charakteristika FVČ pro různé intenzity osvětlení, [4]	30
Obr. 12 Vliv sériového odporu na V-A charakteristiku [4]	31
Obr. 13 Vliv paralelního odporu na V-A charakteristiku [4]	31
Obr. 14 Sériové zapojení solárních článků [4]	32
Obr. 15 Kvadranty V-A charakteristiky solárního článku [4]	33
Obr. 16 V-A charakteristika panelu s částečně zastíněným článkem [4]	34
Obr. 17 Překlenutí proudu bypassovou diodou u FV panelu [10]	35
Obr. 18 V-A charakteristika FV panelu s různým počtem bypassových diod [4]	36
Obr. 19 V-A charakteristika zapojení do DC zátěže	38
Obr. 20 Zapojení MPPT do solární soustavy	41
Obr. 21 Zapojení invertujícího měniče do zátěže	43
Obr. 22 Spínání pracovního cyklu D [9]	45
Obr. 23 V-A charakteristiky panelu s MPPT a třemi pracovními cykly [9]	47
Obr. 24 Princip sledování MPP bodu	49
Obr. 25 Sledování bodu MPP při změně osvětlení	50
Obr. 26 Vývojový diagram P&O [8]	50
Obr. 27 Hodnota a směrnice výkonu podle napětí [8]	51
Obr. 28 Algoritmus metody přírůstkové vodivosti [8]	53
Obr. 30 Fotovoltaický panel SPS10W-12V	57
Obr. 31 Fotovoltaický panel Konarka 120	57
Obr. 32 Zapojení měřícího pracoviště pro měření FV panelů	58
Obr. 33 Fotka zapojení v laboratoři	59
Obr. 34 Blokové schéma programu pro naměření V-A charakteristik	60
Obr. 35 Naměřená V-A charakteristika panelu Rich Solar	61
Obr. 36 Naměřená V-A charakteristika panelu Conrad	61
Obr. 37 Naměřená V-A charakteristika panelu Konarka	62
Obr. 38 Blokové schéma v programu VEE pro metodu Perturb and Observe	64
Obr. 39 Logika algoritmu Perturb and Observe	65
Obr. 40 Metoda P&O aplikovaná na panelu Rich	66
Obr. 41 Metoda P&O aplikovaná na panelu Conrad	66
Obr. 42 Metoda P&O aplikovaná na panelu Konarka	67
Obr. 43 Blokové schéma v programu VEE pro metodu přírůstkové vodivosti	69
Obr. 44 Logika algoritmu přírůstkové vodivosti	70

Obr. 45 Metoda IC aplikovaná na panelu Rich	71
Obr. 46 Metoda IC aplikovaná na panelu Conrad	71
Obr. 47 Metoda IC aplikovaná na panelu Konarka	72
Obr. 48 Snižování intenzity osvětlení FVČ u metody P&O na panelu Conrad	73
Obr. 49 Snižování intenzity osvětlení FVČ u metody IC na panelu Conrad	74
Obr. 50 Foto z laboratorního zapojení pro srovnávání metod	76
Obr. 51 Termo snímek zatíženého článku Rich	77
Obr. 52 Termo snímek zatíženého článku Conrad	78
Obr. 53 Termo snímek zatíženého článku Konarka	79

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Suma záření dopadu na nakloněnou rovinu v Praze [3].....	15
Tab. 2 Hodnoty parametrů pro různé FV panely, [4].....	26
Tab. 3 Přehled procentních přírůstků a poklesů u elektrických parametrů FVČ	29
Tab. 4 Srovnání vlastností procesorové a analogové verze MPPT	39
Tab. 5 Srovnání technologií PWM a MPPT	42
Tab. 6 Parametry FVČ Rich Solar	56
Tab. 7 Rozměry FVČ Rich Solar	56
Tab. 8 Parametry FVČ Conrad.....	57
Tab. 9 Rozměry FVČ Conrad	57
Tab. 10 Parametry FVČ Konarka 120.....	57
Tab. 11 Rozměry FVČ Konarka 120	57
Tab. 12 Použité přístroje pro měření V-A charakteristik	59
Tab. 13 Intenzity osvětlení u metody P&O	73
Tab. 14 Intenzity osvětlení u metody IC	74
Tab. 15 Použité přístroje pro srovnávání metod	75
Tab. 16 Naměřené hodnoty teploty a osvětlení	77
Tab. 17 Tabulka dosaženého maxima metodou přírůstkové vodivosti pro panel Rich	77
Tab. 18 Tabulka dosaženého maxima metodou sledování změny výkonu pro panel Rich.....	77
Tab. 19 Naměřené hodnoty teploty a osvětlení	78
Tab. 20 Tabulka dosaženého maxima metodou přírůstkové vodivosti pro panel Conrad	78
Tab. 21 Tabulka dosaženého maxima metodou sledování změny výkonu	78
Tab. 22 Naměřené hodnoty teploty a osvětlení	79
Tab. 23 Tabulka dosaženého maxima metodou přírůstkové vodivosti	79
Tab. 24 Tabulka dosaženého maxima metodou sledování změny výkonu	79

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

FV	Fotovoltaický
FVČ	Fotovoltaický článek
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PB	Pracovní Bod
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)

ÚVOD

Solární, neboli fotovoltaické články, jako jedna z obnovitelných energií, zažívají v posledních cca deseti letech dost značný boom. Cena panelů pomalu klesá a jejich účinnost roste, což je dobrou předzvěstí toho, že při tomto trendu se může podíl solární energie v zásuvkách zvýšit. Ovšem i přes tento trend je v současné době stále nutné tuto energii dotovat, protože samotná účinnost zatím příliš vysoká není a cena kompletního zapojení pro rodinný či bytový dům je stále poměrně vysoká (při maximálním výkonu 2600W se pohybujeme okolo 160tis Kč) [1]. Např. cena komerčně dostupného článku z polykrystalického křemíku IBC PolySool 260CS je cca 5800 Kč za panel s maximálním výstupním výkonem 260W a účinností 15,9% [2]. Účinnost panelů bývá zmenšována špatně zvolenou technologií pro sledování maximálního bodu účinnosti a právě tímto tématem se bude zabývat tato diplomová práce.

1 SOLÁRNÍ ENERGIE

1.1 Solární energie na Zemi

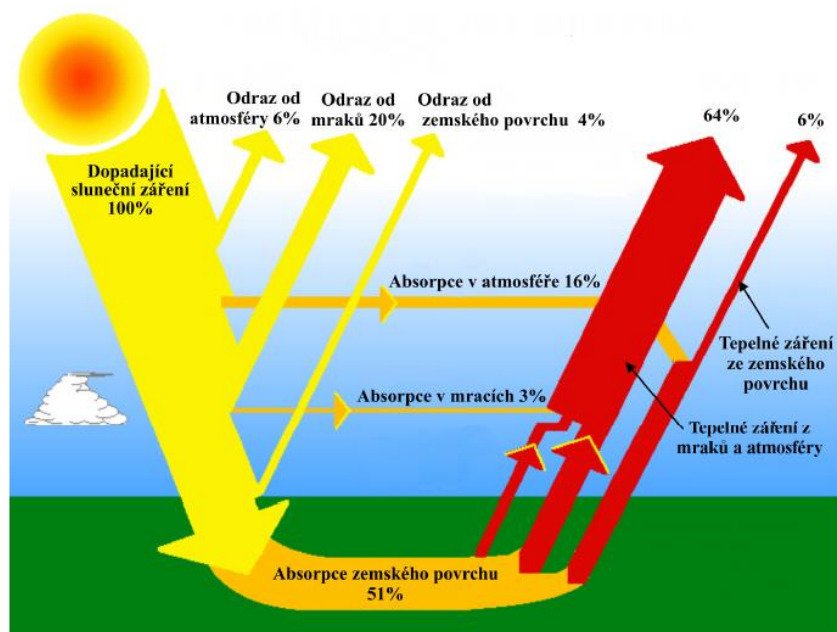
Solární energie (sluneční záření) představuje formu energie, která na Zemi dopadá a využívá se. Vzniká jadernými přeměnami v nitru Slunce. Vzhledem k tomu, že vyčerpání zásob vodíku na Slunci je očekáváno až v řádu miliard let, je tento zdroj energie označován jako obnovitelný.

Je to energie elektromagnetického záření, jehož spektrum se dělí na:

- **Záření ultrafialové** (s vlnovou délkou pod 400 nm)
- **Záření viditelné** (s vlnovou délkou od 400 do 750 nm)
- **Záření infračervené** (s vlnovou délkou přesahující 750 nm)

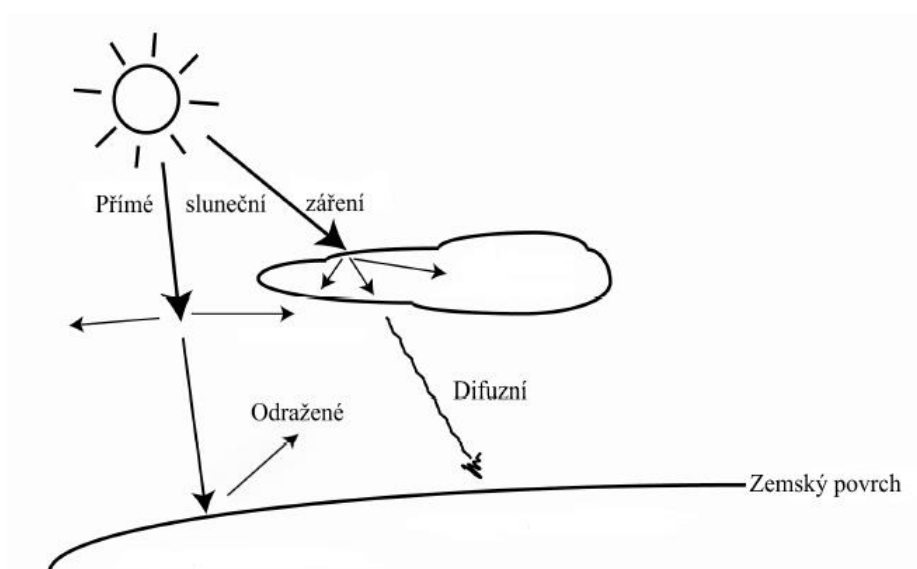
Teplota chromatičnosti slunce, neboli jeho barevná teplota povrchu slunce je zhruba 5700 K a více jak polovina vyzařované energie je v oblasti viditelného spektra. Příkon záření dopadajícího na povrch zemské atmosféry činí $1\,366\text{ W/m}^2$. Toto množství se nazývá solární konstanta. Ve skutečnosti není konstantní, neboť oběžná dráha Země kolem Slunce je eliptická, a to způsobuje kolísání ve velikosti solární konstanty přibližně kolem 3 % (asi 40 W/m^2). Malé změny solární konstanty jsou též spjaté s cykly sluneční aktivity, ty ale dosahují maximálně desetin procenta. Podstatnou vlastností elektromagnetických vln je jejich duální charakter. Současně se chovají jako vlny i jako částice. Vlnový charakter se více projevuje u záření s delší vlnovou délkou a částicový charakter se více projevuje u záření s kratší vlnovou délkou.

Při průchodu slunečního záření zemskou atmosférou probíhá řada dějů, které nám zobrazuje obrázek č.1. Část záření, které proniká na Zemi se odráží od zemské atmosféry a zbylá část prochází atmosférou, kde dochází k absorpci a rozptylu záření na molekulách plynů atmosféry a částicích nečistot.



Obr.1 Dopad sluneční energie na Zemi [3]

Dopadající sluneční záření se v základu dělí na přímé, difuzní a odražené. Jednotlivé složky jsou vyobrazeny na obr. 2. Nejvíce přímého slunečního záření je při jasném počasí bez mraků, které by stínily. Toto záření je směřováno v úzkém úhlu přímo ze slunce. Jeho hlavní výhodou je možnost koncentrace paprsků pomocí zrcadel nebo čoček na určitý bod. Difuzní záření vzniká hlavně rozptylem přímého slunečního záření v mracích a také na částech nečistot v atmosféře. Toto záření je rozptýleno a nelze ho koncentrovat. Za jasných dnů je difuzní záření velmi nízké a dosahuje z celkového dopadajícího záření asi 20 %.



Obr. 2 Rozdělení slunečního záření

Na dostupnost sluneční energie mají hlavní roli vliv tři základní aspekty.

- **Zeměpisná šířka** – Nejvíce záření dopadá v rovníkové oblasti a nejméně záření u pólů.
- **Roční doba** – Roční doba má, stejně jako zeměpisná šířka, rozhodující vliv na intenzitu dopadu slunečního záření. Intenzita slunečního záření se mění v průběhu celého roku – v zimě je den kratší a slunce je na obloze nízko. V letním období dopadne na jeden metr čtvereční plochy, která je orientována na jih 7 – 8 kWh a při oblačné obloze zhruba 2 kWh. V zimních měsících pak jen zhruba 3 kWh při slunečném dni a při oblačné obloze dokonce méně než 0,3 kWh. [3]
- **Sklon a orientace článku** – FVČ pracuje s nejvyšší účinností, pokud na něj svítí slunce kolmo. Neoptimálnějším řešením by tedy bylo natáčet článek podle pohybu slunce po obloze. Tato varianta je ale značně drahá a v praxi se používá jen zřídka. Standardně se články osazují se sklonem 45°, orientované na jih. Pokud bychom chtěli zvýšit zisk panelu v zimě, je možné zvýšit úhel mezi zemí a článkem na 60°, jelikož se slunce přes zimu pohybuje po obloze níž než v létě. Přehled sumy záření v průběhu roku je znázorněná v tabulce 1.

Praha	Suma záření na nakloněnou plochu [kWh/m ² /měsíc]						
Měsíc	Úhel sklonu ve stupních od vodorovné roviny						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Leden	23	27	32	34	35	36	36
Únor	40	47	53,5	58	60	60	57
Březen	82	93	101	104	103	99	90
Duben	110,5	121	127,5	129	120,3	108	91,5
Květen	153	165	172	170	150	124	94
Červen	168	177	181	176,5	158	126	92,5
Červenec	162	174	182	180	158	130	98
Srpen	132	145	153	154	144	127	106
Září	92	106	116	120	118	113	102
Říjen	45,3	57	65	70,5	74	74	70
Listopad	22	26,5	30,5	33	34	35	34,5
Prosinec	15,8	18,9	21	22	23	22,6	22,3

Tab. 1 Suma záření dopadu na nakloněnou rovinu v Praze [3]

Solární podmínky pro Českou republiku při kolmém dopadu:

- v letním poledni max. 1 000 až 1 050 W/m²
- v zimním poledni max. 300 W/m²
- při souvisle zatažené obloze max. 100 W/m²
- v noci (při úplňku) max. 0,01 W/m²

2 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY

2.1 Fotoelektrický jev

Princip fotoelektrického jevu byl popsán již v roce 1839 Alexandrem E. Becquerelem. Je založen na polovodičových součástkách a jejich PN přechodu. Po dopadu záření na fotoelektrický článek se začnou pohlcovat fotony, které svou energií způsobí uvolňování elektronů v článku. Elektrické náboje, elektron-díra jsou následně odváděny z článku přes kontakty a jsou odváděny do elektrického zapojení. Určitého praktického využití dosáhly jako jedny z prvních selenové fotočlánky, které se dodnes používají v expozimetrech fotoaparátů. Pro výrobu elektrické energie byly použitelné až křemíkové fotovoltaické články vyrobené v Bellových laboratořích v USA v roce 1954.

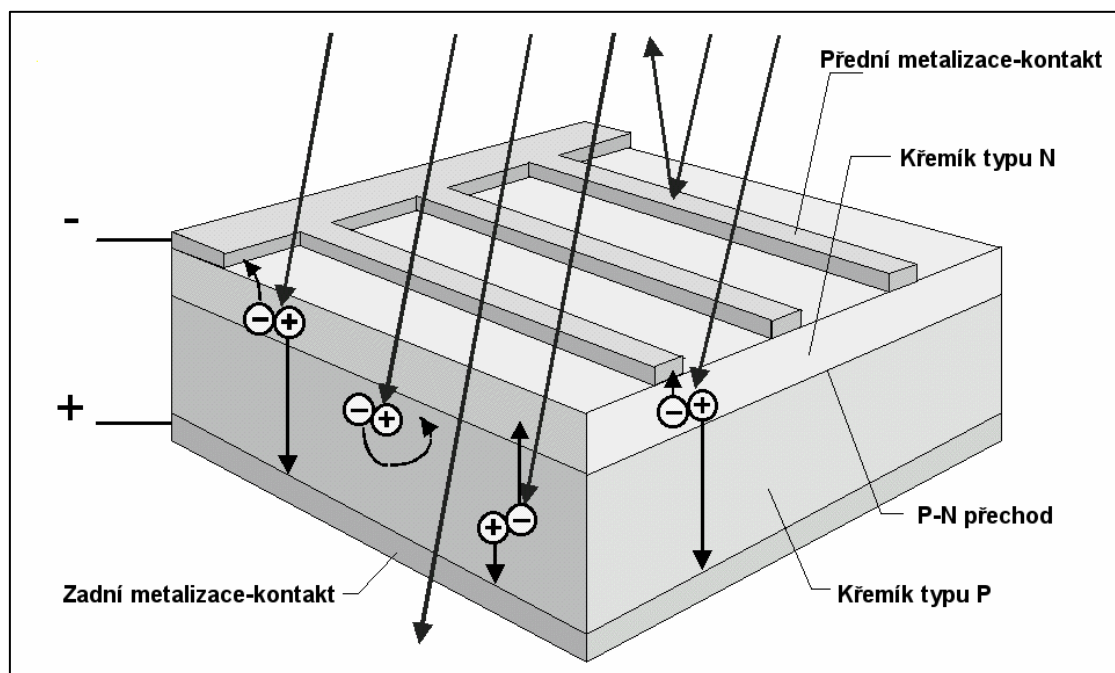
2.2 Funkce fotovoltaického článku

Nejčastěji používaný materiál pro výrobu článků je křemík (Si). Jedná se o pevnou krystalickou látku s diamantovým typem struktury, která obsahuje 4 valenční elektrony. Křemík je schopen absorbovat část slunečního záření ve viditelné a infračervené oblasti a má polovodičové vlastnosti, tzn. vlivem osvětlení vzrůstá jeho vodivost. Po absorpci fotonu ze světelného záření dojde k přenosu jeho energie na elektron ve valenční vrstvě některého z atomů křemíku. Elektron se uvolní a v mřížce zůstane jeden přebytný kladný náboj, který nazýváme dírou. Do této díry s kladným potenciálem mohou přejít elektrony z jiného atomu Si a po něm zůstane opět další díra. Její chování můžeme připodobnit k pohybu volného kladného náboje. Absorpci fotonů ze záření nám ve struktuře polovodiče vznikají páry elektron-díra, které fungují jako nosiče náboje. Pokud bychom ovšem nechali křemík samostatně, tak by se tento jev projevoval pouze vyzařováním tepla. Abychom dosáhli vzniku elektrického napětí, musí být křemík obohacen o další polovodičový prvek. Budeme-li dotovat křemík, který má 4 valenční elektrony, například fosforem který má 5 valenčních elektronů, vznikne nám takzvaný polovodič typu N aneb polovodič, který má o jeden elektron navíc. Obecný zápis: $A^{IV} + B^V > N$. Ten je v kovalentní vazbě vázán nejslabší silou, a tudíž se může snadno pohybovat. Budeme-li ovšem křemík dotovat jinými polovodičovými prvky jako jsou například bor nebo galium, které obsahují pouze 3 valenční elektrony, vznikne polovodič typu P. Obecný zápis: $A^{IV} + B^{III} > P$. Jejich spojením dosáhneme P-N přechodu, který je základem pro funkci nejen FVČ, ale i usměrňovacích diod, tranzistorů a většinu polovodičových součástek. Na rozhraní těchto dvou vrstev dojde k přechodu části elektronů z vrstvy, která jich má více (N) do vrstvy, kde je jich méně (P).

V důsledku tohoto jevu se objeví na P-N přechodu elektrické pole, které přesun dalších elektronů zastaví a dojde k ustavení dynamické rovnováhy. Toto elektrické pole dokáže oddělit

elektrony a díry vzniklé absorpcí fotonu. Elektrony „pošle“ do N polovodiče a díry do P polovodiče. Díky tomu nám vznikne na kontaktech FVČ napětí a do připojené zátěže (spotřebič) začne téct elektrický proud. Fotovoltaický článek může sloužit jako zdroj el. proudu díky tomu, že elektrony uvolněné absorpcí fotonů ze slunečního záření musí napřed projít skrz vnější obvod (spotřebičem), a teprve potom se mohou spojit s dírami a dojde k rekombinaci.

Základní princip fotoelektrického jevu je uveden na obr. 3 a matematický model jevu je popsán Einsteinovou rovnicí 2.1.



Obr. 3 Princip fotoelektrického jevu [4]

Einsteinova rovnice fotoelektrického jevu:

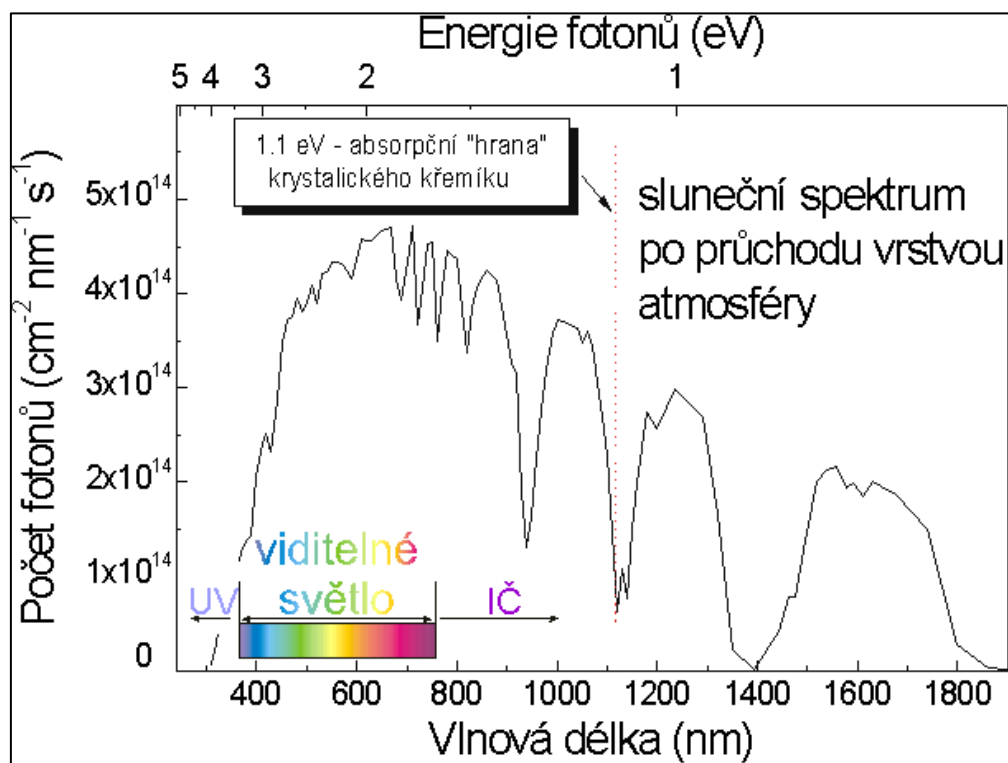
$$h \cdot f = W_v + \frac{1}{2} \cdot mv^2 \quad (2.1)$$

kde:	<i>h</i>	Planckova konstanta	[J.s]	<i>m</i>	hmotnost	[kg]
	<i>f</i>	frekvence	[Hz]	<i>v</i>	rychlost	[m.s ⁻¹]
	<i>W_v</i>	výstupní práce	[eV]			

Fotovoltaické články bývají zpravidla tenké a obsahují i antireflexní vrstvu, která snižuje odraz slunečních paprsků. Z obou stran je článek opatřen kontakty, které sbírají a odvádějí elektrický proud. Přední kontakt je tvořen pouze mřížkou, aby nebránil průchodu záření, a na zadní straně jde o rovnoměrný povlak. Křemíkový P-N přechod pak musí být chráněn před nečistotami a vlhkostí a proto je celá sestava hermeticky uzavřena.

2.3 Křemík

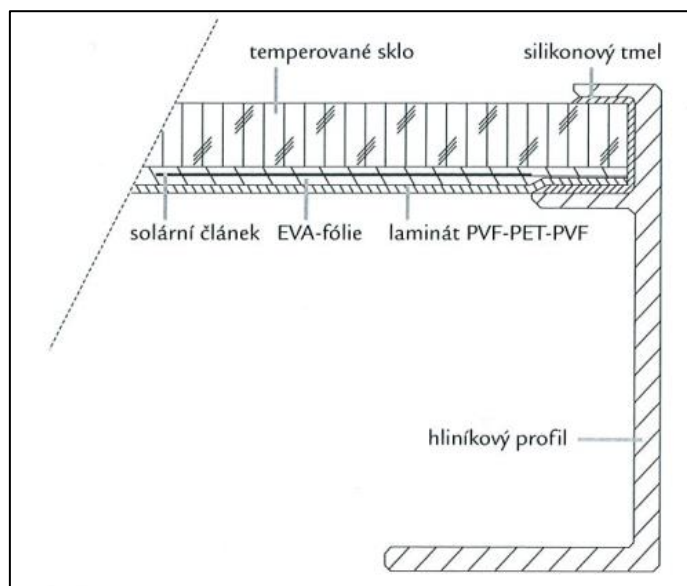
Křemík je polovodič s modrošedým kovovým leskem s vysokou tvrdostí. Je velmi hojně zastoupen v zemské kůře (téměř 26 %) a v přírodě se v čisté formě nevyskytuje. Křemík absorbuje světelné záření o kratší vlnové délce než 1 000 nm (IR, světlo a UV část spektra).



Obr. 4 Sluneční spektrum po průchodu bezoblačnou atmosférou pod úhlem 48° od normály (tzv. spektrum AM1,5). Současně je vyznačena absorpční hrana krystalického křemíku [5]

2.4 Vlastnosti a druhy FVČ

Fotovoltaický článek se chová téměř jako zdroj konstantního proudu. Jeho velikost závisí na intenzitě slunečního záření dopadajícího na článek a také na jeho ploše, neboli počtu fotonů, které na článek dopadnou a jsou článkem zachyceny. Napětí při chodu naprázdno bývá přibližně 0,6 V a při maximálním výkonu přibližně 0,5 V. Vše závisí samozřejmě na použitém materiálu a způsobu provedení. Sério-paralelní zapojení článků umožní dosáhnout potřebného napětí i proudu. Zpravidla se zapojuje do série 36 článků pro dosažení výstupního napětí cca 17 V DC, které je vhodné pro nabíjení 12 V akumulátorů. Běžně se při plném slunečním svitu dosahuje výkon přesahující 100 W/m² (přesná hodnota závisí na typu článku a je deklarovaná výrobcem).



Obr. 5 Schéma fotovoltaického panelu v řezu [6]

Druhy článků lze rozdělit podle použitých materiálů a technologií:

- **články z monokrystalického křemíku** – krystaly jsou větší než 10 cm, vyrábí se tzv. Czochralského procesem při teplotě 1100 °C, kdy vznikne monokrystalický ingot (wafers), který se poté rozřeže na tenké plátky 150 až 300 μm a následně na čtverce. Leptáním se na destičce vytvoří textury a destička se může dopovat fosforem, z čehož nám vznikne P-N přechod. Můžou se vyrábět i přímo ve formě tenkých pásků (ribbon growth). Účinnost se pohybuje kolem 14-17% (u článků pro kosmické účely až 19 %);
- **články z polykrystalického křemíku** – jedná se o odlévání ingotu z křemíků (odpadá Czochralského proces). Přítomnost většího počtu menších krystalů → větší počet rozhraní vede k nižší účinnosti, ale výroba je levnější a rychlejší. Pro udržení účinnosti

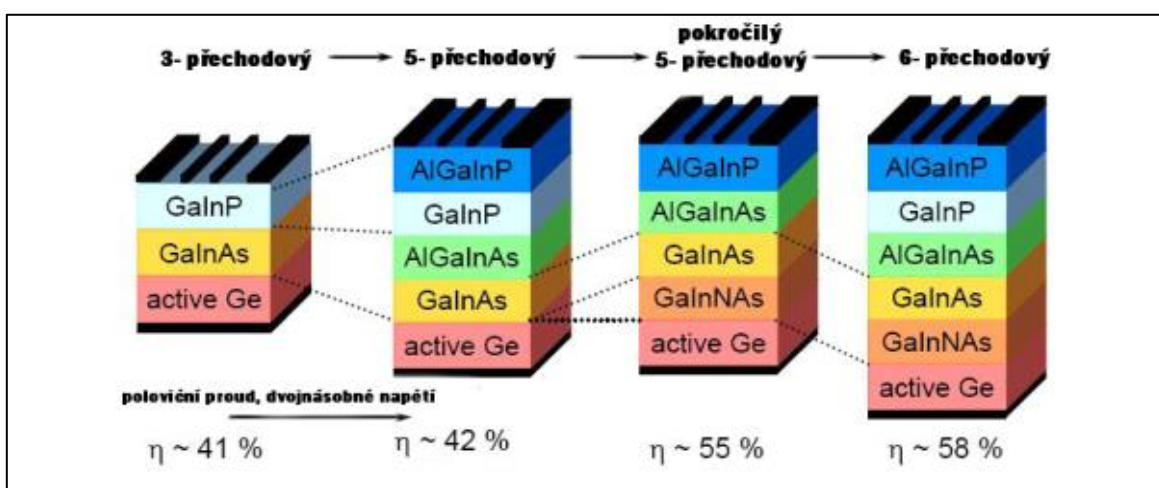
musí být křemíková vrstva vyšší. Typicky 300 μm . Účinnost pro komerčně vyráběné články se uvádí 13-16 %;

- **články z amorfního křemíku** – tento typ křemíku nemá krystalickou nýbrž sklovitou strukturu. Vyrábí se napařováním na vhodný substrát a obsahuje jisté procento vodíku, protože jsou taveny ve vodíkové atmosféře. Dají se připravit ve velmi tenké vrstvě. Jsou flexibilní, mají vyšší napětí naprázdno a velkou absorpci světla. Jeho hlavní nevýhodou je postupné zhoršování vlastností a účinnosti kolem 5-7 %;
- **vícepřechodové struktury (multijunction)** – pokud má FVČ jen jeden P-N přechod, tak využívá pouze část energie dopadajícího záření. Fotony, které mají nižší energii než takzvaný „bandgap“ (rozdíl v energii posledního obsazeného pásu a prvního neobsazeného, vodivostního pásu), nedokáží uvolnit elektron. Fotony s energií vyšší elektron uvolní, ale využije se jen ta část jejich energie, která je právě rovna energii potřebné k vyždvižení elektronu do vodivostního pásu. To, co je navíc, se promění na teplo, což je nežádoucí. Jednou z možností, jak významně zvýšit účinnost fotovoltaiických článků, je proto více vrstev s různými P-N přechody, uspořádanými tak, aby bylo možné optimálně využít fotony s různou energií;
- **články CIS (CuInSe_2)** – jde o tenkovrstvé články ze selenidu mědi a india. Vyznačují se vysokou absorpcí záření, a mohou být proto velmi tenké. Lze u nich dosáhnout vysoké úrovně účinnosti (v laboratoři až 18 %), což je hodně s ohledem na to, že se jedná o tenkovrstvé články;
- **články z teluridu kadmnatého (CdTe)** – jde o další slibný typ polykrystalického tenkovrstvého článku. Problematickou vlastností je zde relativně velký elektrický odpor, který vede ke ztrátám;
- **články z galiumarsenidu (GaAs)** – jde o monokrystalické tenkovrstvé články, které se dají vyrobit s mírně odlišnými vlastnostmi a tak optimálně přizpůsobit potřebám, mají vysokou absorpci záření, jsou málo citlivé na vyšší teploty a velmi odolné vůči poškození radioaktivním nebo kosmickým zářením. Základní nevýhodou je vysoká cena monokrystalického GaAs . GaAs se často používá ke konstrukci vícepřechodových fotovoltaiických článků;

2.5 Vícepřechodové struktury

Pokud se použije vícevrstvá struktura, jejíž každá část je optimalizována po určitou část slunečního spektra, pak lze dosáhnout podstatně lepšího využití energie dopadajícího záření. Využívá se 3 – 6 struktur. V horní vrstvě je umístěn polovodič s největší šířkou zakázaného pásu a v něm se absorbují elektrony s nejvyšší energií. Elektrony, které mají nižší energii, projdou a generují páry elektron-díra v dalších, nižších vrstvách. Čím hlouběji je vrstva polovodiče ve FVČ situována, tím má menší šířku zakázaného pásu. Každá vrstva absorbuje jen fotony, které mají větší energii než je její zakázaný pás. Cílem tohoto snažení je pokrýt celé světelné spektrum a dosáhnout tak podstatně vyšší účinnosti FVČ.

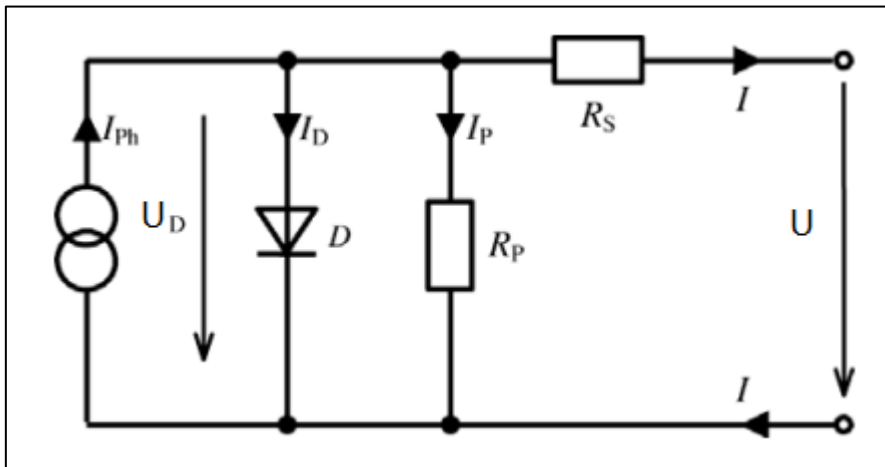
Vývoj těchto „sendvičových“ struktur stojí zajisté nemalé úsilí. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně se zvažuje jejich použití ve spojení s koncentrátory slunečního záření, které umožní podstatně zmenšit plochu fotovoltaického panelu s tím, že se na něj soustředí záření pomocí čočky nebo zrcadla.



Obr. 6 Zobrazení vícepřechodových struktur a jejich účinností [7]

2.6 Náhradní obvody fotovoltaického článku

Fotovoltaický článek je ve své podstatě velká dioda, která se skládá z N a P typu. Neosvětlený FVČ se chová jako klasická polovodičová dioda a tudíž z ní bude vycházet náhradní schéma a matematické rovnice. Pro strukturu FVČ můžeme sestavit náhradní obvod, který máme znázorněn na obr. 7. Jedná se o tzv. jednodiodový model.



Obr. 7 Náhradní jednodiodový obvod pro strukturu fotovoltaického článku, [4]

Na základě náhradního modelu a Kirchhoffova zákona můžeme psát:

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \quad [A] \quad (2.2)$$

kde	I_{ph}	je proud vygenerovaný fotovoltaickým jevem	[A]
	I_D	je proud tekoucí diodou	[A]
	I_P	je svodový proud	[A]

Proud I_P je roven:

$$I_P = \frac{U_D}{R_p} = \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} \quad [A] \quad (2.3)$$

po vyjádření to bude:

$$I = I_{ph} - I_D - I_P =$$

$$= I_{ph} - I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} \quad [A] \quad (2.4)$$

Kde

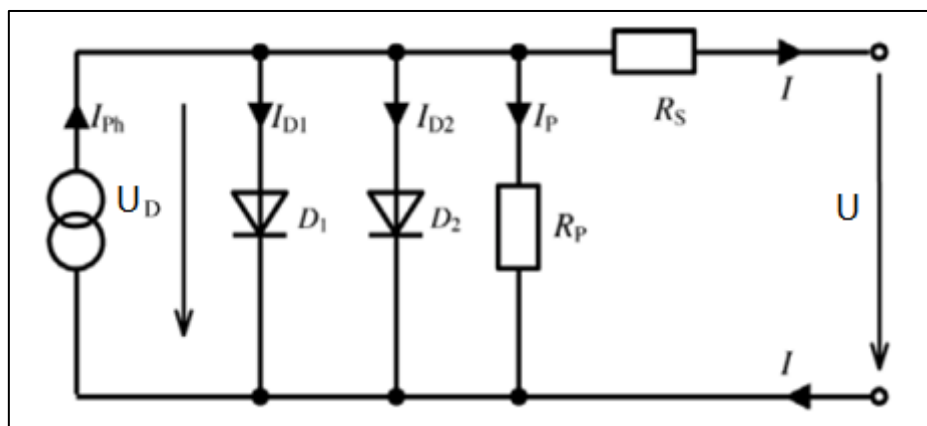
I – výstupní proud [A]

I_S – saturační proud [A]

m – koeficient zohledňující kvalitu diody z pohledu materiálového složení (v ideálním případě je roven 1) [-]

U_T – teplotní napětí [V]

Pokud je zapotřebí z jakéhokoliv důvodu dokonalejší matematický popis, může být použito dvoudiodové schéma, kdy je paralelně připojena další dioda. Budou zde dva materiálové koeficienty a dva rozdílné proudy na diodách. V tab. č.2 jsou uvedeny hodnoty panelů od tří různých výrobců.



Obr. 8 Náhradní dvoudiodový obvod struktury fotovoltaického článku, [4]

Matematické vyjádření modelu:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_P \quad [A] \quad (2.5)$$

$$I = I_{ph} - I_{S1} \cdot \left[\exp \left(\frac{U + R_S \cdot I}{m_1 V_T} \right) - 1 \right] - I_{S2} \cdot \left[\exp \left(\frac{U + R_S \cdot I}{m_2 V_T} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_S \cdot I}{R_P} \quad [A] \quad (2.6)$$

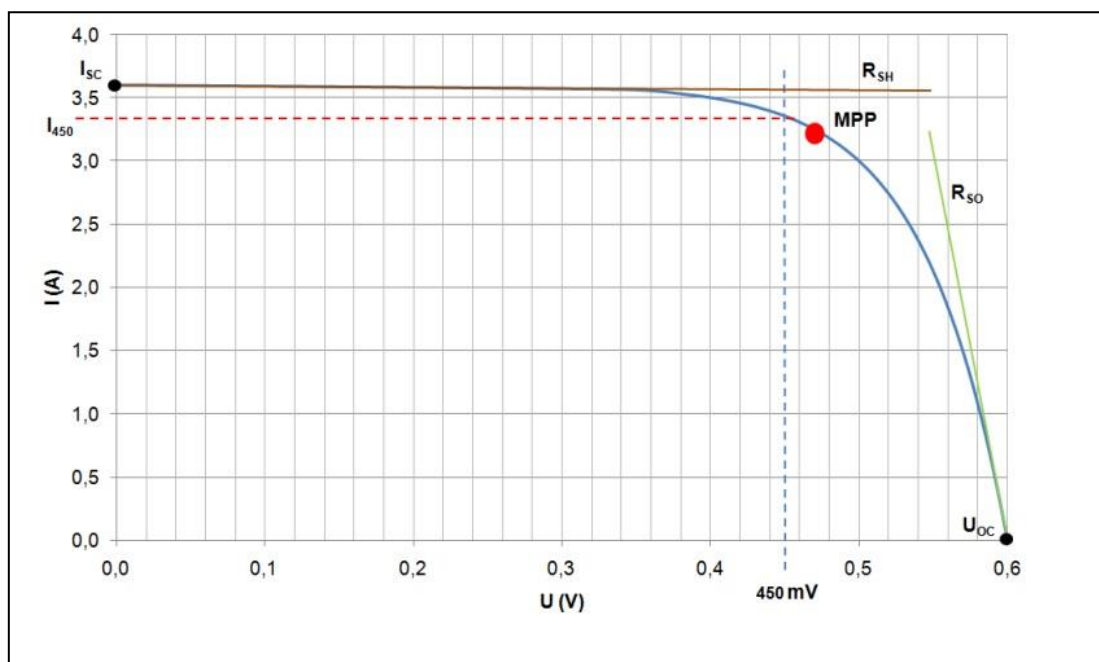
Kde	I – výstupní proud	[A]
	I_{ph} – proud FVČ	[A]
	I_{S1} – proud tekoucí diodou 1	[A]
	I_{S2} – proud tekoucí diodou 2	[A]
	U – výstupní napětí	[V]
	R_S – sériový odpor FVČ	[Ω]
	R_P – paralelní (svodový) odpor FVČ	[Ω]
	m – koeficient zohledňující kvalitu diody z pohledu materiálového složení (v ideálním případě je roven 1)	[-]
	U_T – teplotní napětí	[V]

	c_0 m^2/V	I_{S1} nA	I_{S2} μA	m_1 –	m_2 –	R_S $m\Omega$	R_P Ω
AEG PQ 40/50	$2.92 \cdot 10^{-3}$	1.082	12.24	1	2	13.66	34.9
Siemens M50	$3.11 \cdot 10^{-3}$	0.878	12.71	1	2	13.81	13.0
Kyocera LA441J59	$3.09 \cdot 10^{-3}$	1.913	8.25	1	2	12.94	94.1

Tab. 2 Hodnoty parametrů pro různé FV panely, [4]

2.7 Parametry fotovoltaického článku

Všechny důležité parametry u FV článku se popisují voltampérovou charakteristikou. Typická V-A charakteristika je zobrazená na obr. 9 i s hlavními body, které budou popsány níže.



Obr. 9 Nákres A-V charakteristiky s vyobrazením MPP [8]

I_{sc} – proud nakrátko

Proud nakrátko bývá označován také jako fotoelektrický proud a můžeme jej odečíst z charakteristiky. Jedná se o maximální proud, který je schopen článek dodávat a je závislý na:

- Teplotě
- Intenzitě osvětlení
- Ploše a citlivosti FV

U_{oc} – napětí naprázdno

Jedná se o napětí, které je naměřeno na svorkách FVČ při odpojené zátěži. Současně je to maximální napětí, které může článek teoreticky dodávat (při jisté teplotě a osvětlení).

PB – Pracovní Bod

Pracovní bod FVČ je bod, ve kterém článek pracuje a ovlivňuje výstupní výkon. Poloha pracovního bodu je sama o sobě závislá na vlastnostech spotřebiče. Má na něj nemalý vliv i teplota článku. Pokud dopadá na FVČ vysoká intenzita slunečního záření a není chlazen (ať už jde o nucené chlazení vodou či povětrnostními podmínkami), tak dochází ke zhoršení elektrických vlastností neboli poklesu výstupního napětí a tím pádem poklesne i výkon, který článek dodává. Samozřejmě, že nejvýhodnější, pokud se PB přímo kryje s MPP. Polohou a regulací PB se budeme zabývat dále v této diplomové práci.

MPP – Maximum Power Point

Je to bod, ve kterém má článek největší výstupní výkon. Na V-A charakteristice se jeho pozice odhaduje pomocí proudu I_{450} , což je proud protékající článkem a naměřený při napětí 450 mV.

Pomocí MPP můžeme určit i vnitřní odpor článku.

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} [\Omega] \quad (2.7)$$

Kde: U_m je napětí při maximálním výkonu [V]

I_m je proud při maximálním výkonu [A]

FF-Fill Faktor (činitel plnění)

Parametr FF je poměrem mezi maximálním výkonem a výkonem, který je dán pomocí proudu nakrátko a napětím naprázdno. Z toho plyne, že činitel plnění je v ideálním případě 1. V praxi je FF samozřejmě menší. Podle tohoto faktoru posuzujeme kvalitu zpracování FVČ. Je závislý např. na kvalitě zpracování kontaktů článku, použitém materiálu a odporu aktivní vrstvy. FF je dán vztahem:

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{OC} \cdot I_{SC}} = \eta_{el} [-] \quad (2.8)$$

2.7.1 Vliv teploty a osvětlení na FVČ

Rostoucí teplota polovodičového materiálu má největší vliv na snižování výkonu. I přes to, že proud nepatrně stoupne, napětí nám klesá téměř exponenciálně a ztráta výkonu je tudíž značná. Změnu výkonu v závislosti na teplotě popisuje rovnice 2.9 [8]

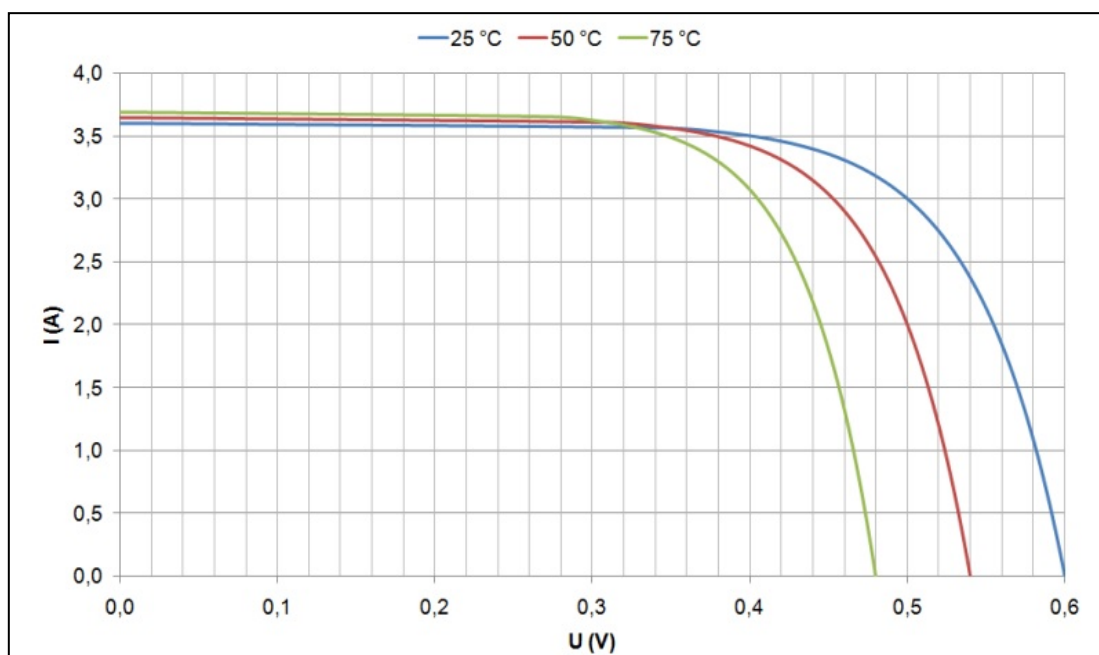
$$\frac{\Delta P}{\Delta \vartheta} = -0,4 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \quad (2.9)$$

kde ΔP je změna výkonu na svorkách článku [W]
 $\Delta \vartheta$ je změna teploty článku [$^{\circ}\text{C}$]

Z daného vztahu je jasné, že pokud nám vzroste teplota o 10 $^{\circ}\text{C}$, tak článek ztratí přibližně 4 % výkonu. Teplotní rozsah pro rovnici (2.9) je -35 $^{\circ}\text{C}$ až +85 $^{\circ}\text{C}$. To je důvod, proč fotovoltaické články mívají přes zimu vyšší výkon při daném osvitu než v létě. Změny konkrétních parametrů panelu jsou uvedeny v tabulce č. 3. [8]

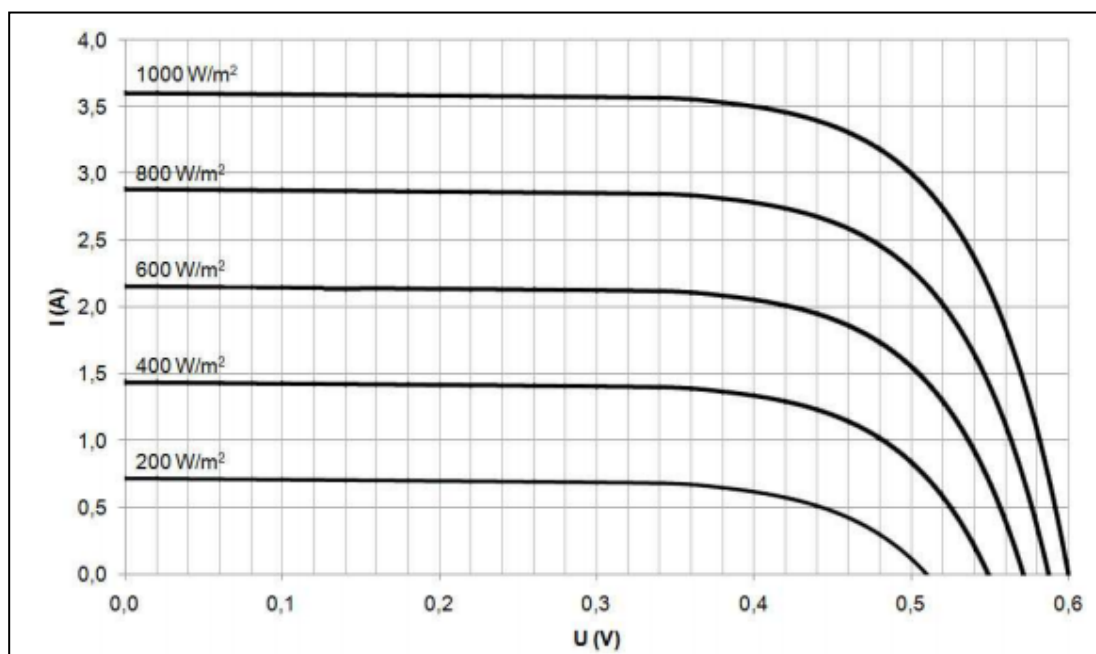
Elektrický parametr	Změna
	[% / $^{\circ}\text{C}$]
I_{sc}	0,05
U_{oc}	-0,38
FF	-0,20
R_{so}	0,32
R_{sh}	-0,70

Tab. 3 Přehled procentních přírůstků a poklesů u elektrických parametrů FVČ



Obr. 10 Vliv teploty na FVČ, [3]

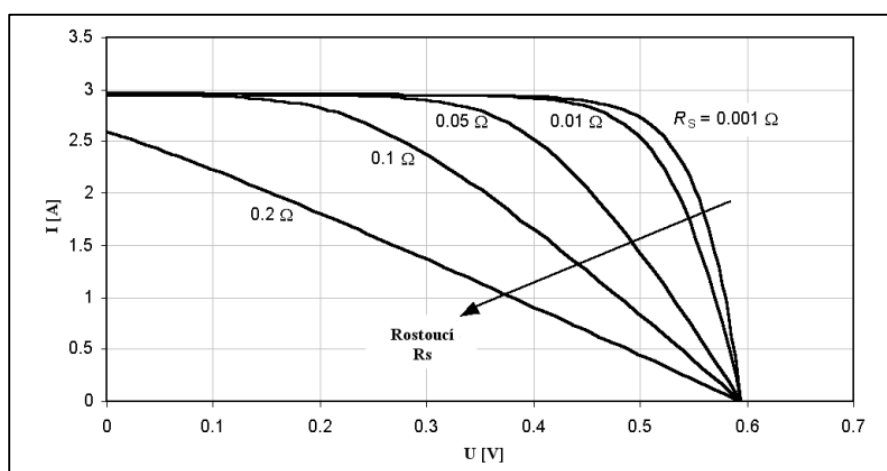
Intenzita osvětlení, jakožto příčina přenosu náboje v článku, má na výstupní výkon rozhodující vliv, viz obr. č 11.



Obr. 11 V-A charakteristika FVČ pro různé intenzity osvětlení, [4]

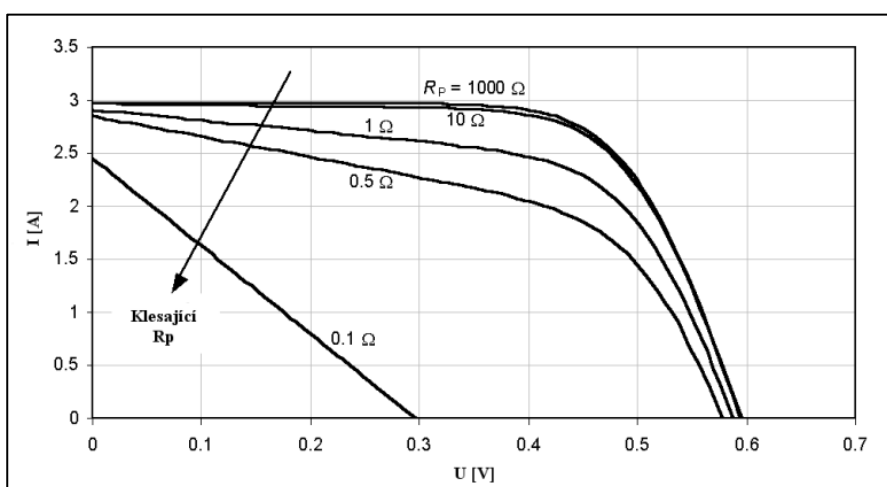
2.7.2 Vliv sériového a paralelního odporu na FVČ

Ve fotovoltaických článcích vzniká ztrátový výkon, který způsobuje sériový a paralelní odpor. Sériový odpor R_S vzniká odporem kontaktů, propojením a odporem polovodiče. V ideálním případě by měla být jeho velikost nulová, čehož ovšem v praxi nelze dosáhnout. V reálu ovlivňuje R_S náklon V-A charakteristiky mezi pomyslným bodem MPP v koleně charakteristiky a U_{OC} . Čím je vyšší, tím nižší je celkový výkon článku. Jeho průběh pro různé hodnoty R_S je vyneseno na V-A charakteristice na obr. 12



Obr. 12 Vliv sériového odporu na V-A charakteristiku [4]

Paralelní odpor R_P je dán defekty v krystalické mřížce anebo svodovými proudy, které se vytváří na okrajových částech FVČ. Ideální hodnota tohoto odporu by se měla blížit k nekonečnu, ovšem malá hodnota R_P snižuje úhel mezi V-A charakteristikou a osou Y, na které je vyneseno proud. Konkrétně je to mezi body I_{SC} a MPP.



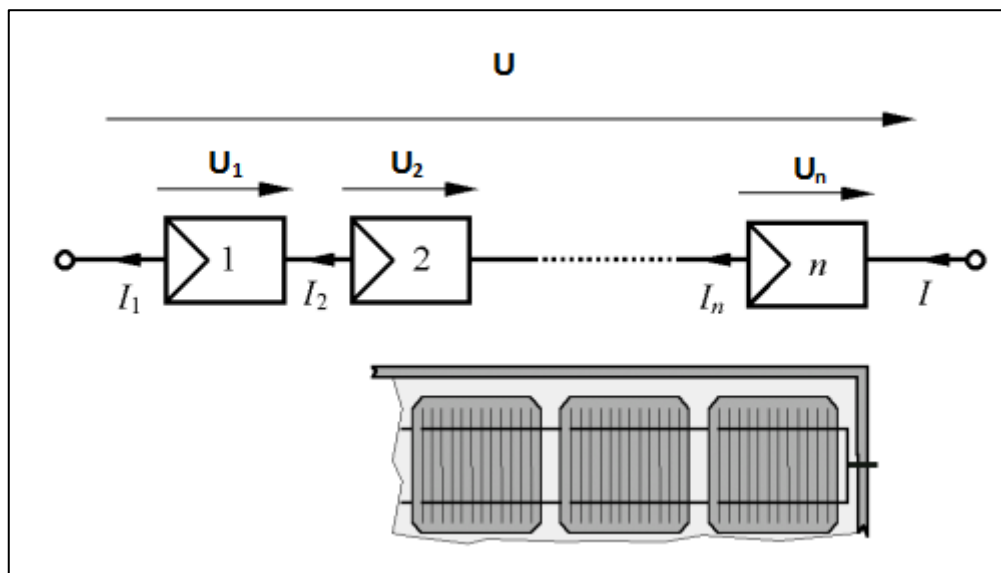
Obr. 13 Vliv paralelního odporu na V-A charakteristiku [4]

2.8 Propojení solárních článků

Jednotlivé články mají samy o sobě malé napětí, a proto se v praxi sdružují do celku. Nejčastější spojení jednotlivých článků je do série (obr. 14). Tento celek vytváří fotovoltaický panel. Fotovoltaické panely se spojují do sériového nebo sério-paralelního zapojení dle potřeby MPPT trackeru, střídače či baterií. Zpravidla mají menší panely výstupní provozní napětí 12 V a cca 32 - 40 křemíkových článků (napětí naprázdno je kolem 17 V DC). Tyto panely se používají pro dobíjení akumulátorů u grid-off systémů. Panely, které se používají pro přenos elektrické energie do sítě, mají křemíkových článků 60 – 72 z důvodu vyššího napětí. Celkové napětí panelu je dáno rovnicí:

$$U = n \cdot U_i \quad [V] \quad (2.10)$$

Kde	U je celkové napětí panelu	[V]
	U_i je napětí jednoho článku	[V]
	n je počet článků v panelu	[ks]

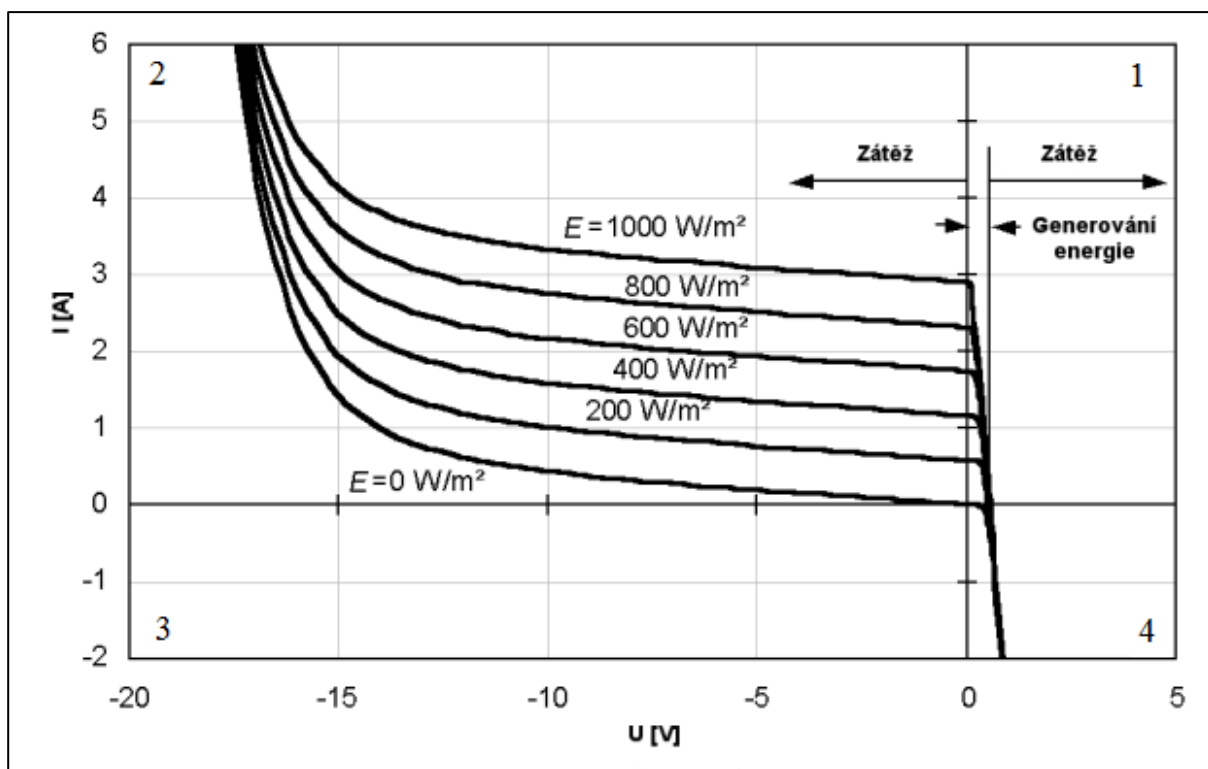


Obr. 14 Sériové zapojení solárních článků [4]

Fotovoltaické panely se spojují do sério-paralelních zapojení, a tím vzniká fotovoltaické pole. Čím vyšší napětí máme na výstupu z fotovoltaického pole, tím menší ztráty jsou na kabeláži vedoucí ke střídači / zátěži.

2.9 Zastínění panelu

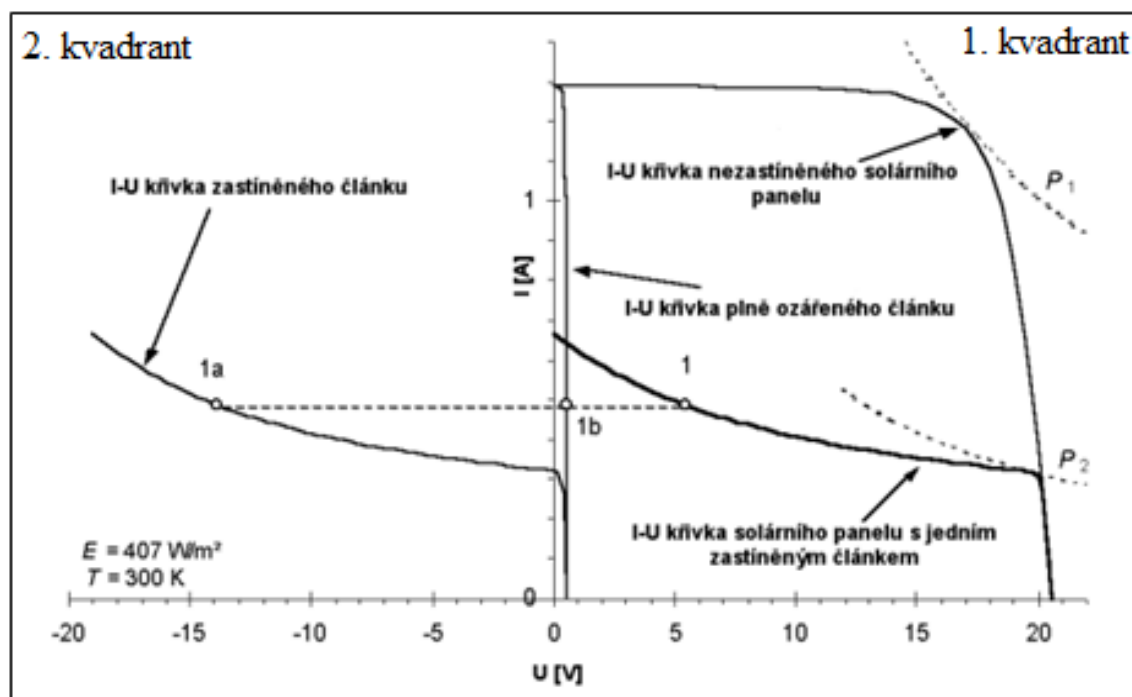
Voltampérová charakteristika článku obsahuje celkově 4 kvadranty. Každý kvadrant charakterizuje, zda-li článek energii spotřebovává nebo dodává. V prvním kvadrantu článek elektrickou energii generuje a ve druhém kvadrantu působí jako zátěž. Musí být k němu připojeno napětí buď z jiného článku, nebo z externího zdroje. Článek se v daném kvadrantu velmi zahřívá a mohlo by dojít až k protavení článku. Nejčastější jev, který to způsobuje je zastínění článku.



Obr. 15 Kvadranty V-A charakteristiky solárního článku [4]

V praxi se stává, že je FV panel vystaven tzv. nehomogennímu osvětlení, což znamená, že světelné podmínky článku nejsou rovnoměrné na celé jeho ploše. To se může stát v reálných podmínkách například tehdy, když je panel zapadáný sněhem, listím či na něj nějaký předmět vrhá stín. U fotovoltaických elektráren je častým jevem, že panely umístěné vpředu v dopoledních hodinách částečně zastíňují panely umístěné za nimi. Toto zastínění má velmi značný vliv na výkon článku.

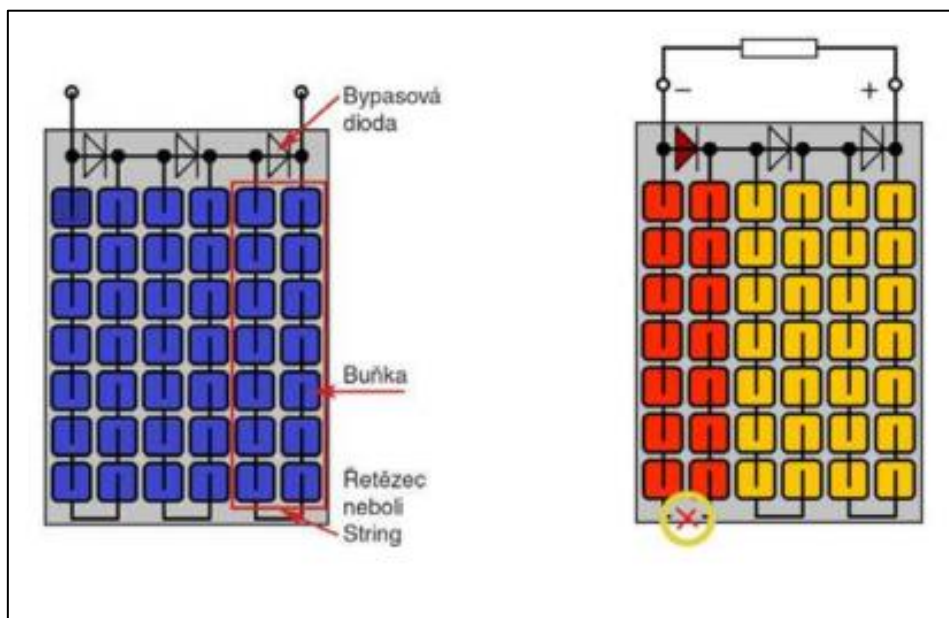
Na obr. 16 je vidět, že se zastíněný článek rázem propadá do druhého kvadrantu (bod 1a) a snižuje celkový výstupní výkon. Jde o panel, který obsahuje 36 vzájemně v sérii zapojených článků a pouze jeden jediný článek je zastíněn ze 75 %. Zbytek panelu je homogenně osvětleno. Z grafu je jasně zřejmé, jak razantně je výkon panelu snížen – při zastínění cca 2 % plochy klesnul výstupní výkon o 70 %. Bod P_1 znázorňuje výkon nezastíněného panelu a bod P_2 výkon po zastínění. [4]



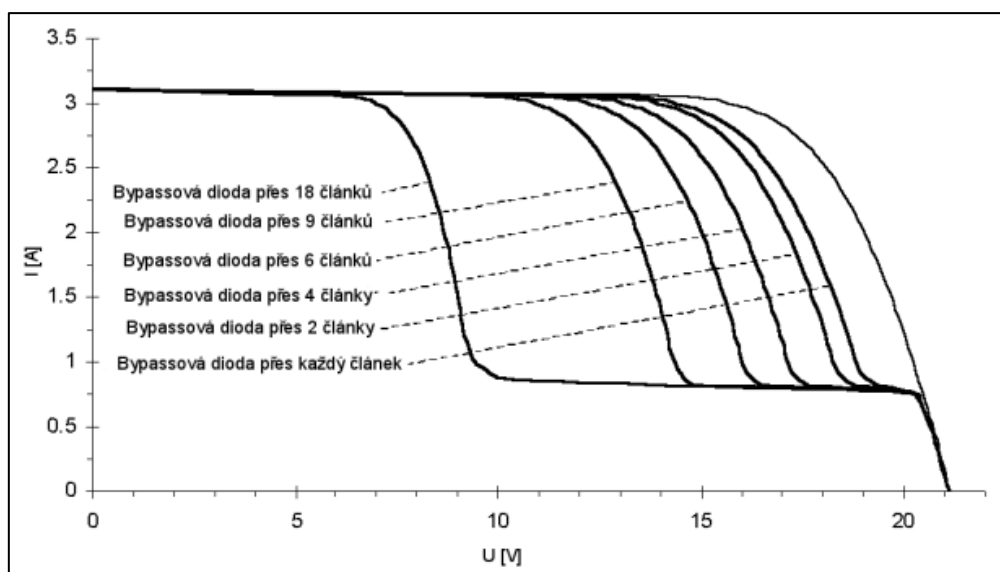
Obr. 16 V-A charakteristika panelu s částečně zastíněným článkem [4]

2.10 Bypassové diody

Bypassové diody jsou integrovány do FV panelů z důvodů probíraných v předchozí kapitole. Nejsou obsaženy v každém prodávaném panelu, ale zpravidla se dávají do velkých panelů určených pro dodávku elektrické energie do sítě. To se provádí už jen z důvodu bezpečnosti, protože pokud by se nehlídaný zastíněný článek začal přehřívat, tak by se nakonec protavil a mohl by způsobit požár u panelů, které jsou umístěné na střechách rodinných domů. Tyto bypassové, neboli překlenovací diody odpojují články či sady článků (stringy), pokud na nich poklesne napětí vlivem zastínění a tím regulují pokles výkonu celého. Je to uzpůsobeno tak, že proud, který by za normálních okolností tekł zastíněným článkem, jím neprochází, a je překlenut diodou. Tyto diody se však neaplikují mezi jednotlivé články, protože by se zvyšovaly ztráty a snižovala účinnost celého panelu, ale překlenují jednotlivé stringy, což jsou řetězce sériově zapojených článků. Překlenutí je ukázáno na obr. 17. Pokud je nějaký článek zastíněn, tak otočí svou napěťovou polaritu a na tento jev reaguje dioda. Do propustného směru přechází při napětí cca $-0,6\text{ V}$. Tato hodnota samozřejmě závisí na konkrétním typu diody. Jako přemostňovací diody se využívají Schottkyho, Germaniové nebo univerzální křemíkové diody. Nejnižší úbytky napětí mají Schottkyho a Germaniové, ale ty jsou limitovány velikostí napětí na panelu.



Obr. 17 Překlenutí proudu bypassovou diodou u FV panelu [10]



Obr. 18 V-A charakteristika FV panelu s různým počtem bypassových diod [4]

3 MPPT

MPPT neboli hledání bodu největší účinnosti je nutnou záležitostí k vyřešení při projektování jakéhokoli funkčního FV systému, jelikož značnou mírou totiž přispívá ke zvýšení efektivity. Princip metod MPPT tkví v tom, že se hledá hodnota napětí U_{MPP} anebo proudu I_{MPP} , a to v závislosti na změnách teploty a intenzity dopadajícího světla, protože tyto dvě proměnné zásadně ovlivňují bod, kde má FV článek nejvyšší účinnost. Hodnota maximálního výkonu se určuje dle vztahu:

$$P_{mpp} = U_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad [W] \quad (3.1)$$

kde:

$$P_{mpp} - \text{Bod maximálního výkonu PV článku} \quad [W]$$

$$U_{mpp} - \text{Bod maximálního napětí (napětí v bodě MPP)} \quad [V]$$

$$I_{mpp} - \text{Bod maximálního proudu (proud v bodě MPP)} \quad [A]$$

Signálem, který vystupuje z algoritmů MPPT je řízen např. DC měnič, který mění svou střidu a tím mění výstupní napětí a proud. Pokud by výstup z uvažovaného článku, který je v konstantní teplotě s konstantním zářením, byl zapojen přímo do DC zátěže, tak by s dost vysokou pravděpodobností nenabyl bodu MPP, ale měl menší hodnotu. Na obrázku 19 můžeme vidět, kde se nachází červeně vyznačený bod zátěže vlivem přímého zapojení do zátěže a nad ním polohu bodu MPP.

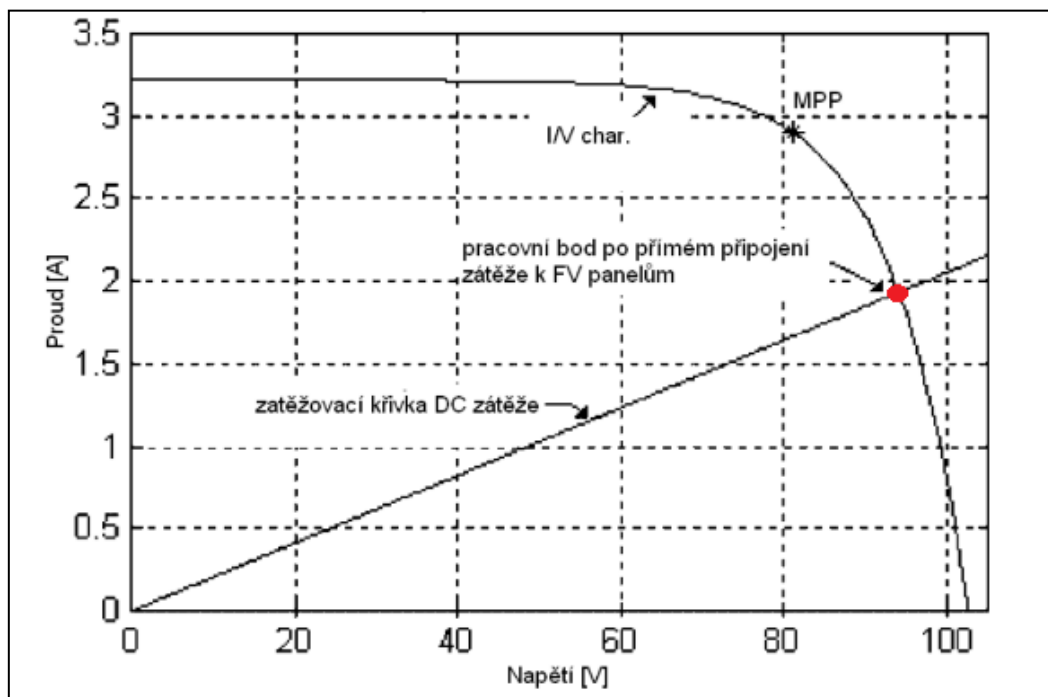
Okamžitá hodnota výkonu v tomto bodě je:

$$P = U \cdot I = 93 \cdot 1,9 = 176,7 \text{ W} \quad (3.2)$$

oproti bodu MPP:

$$P = U \cdot I = 81 \cdot 2,4 = 234,9 \text{ W} \quad (3.3)$$

Při srovnání rovnic 3.2 a 3.3 vidíme, že FV systém je schopen dodávat o 31,2 % vyšší výkon, než pouhé zapojení do zátěže, a to je důvod, proč je důležité aplikovat metody pro dosažení bodu maximální účinnosti.



Obr. 19 V-A charakteristika zapojení do DC zátěže

3.1 MPPT v praxi

Hledání MPP bodu jde v praxi zařídit dvěma odlišnými způsoby. A to buďto pomocí analogových obvodů, nebo pomocí sofistikovanější verze – mikroprocesorů. Jejich shrnutí vlastností je uvedeno v tabulce 4.

Procesorová verze	Analogová verze
Libovolné možnosti zobrazení naměřených dat a jejich digitální zpracování, vyhodnocení	Návrh obvodů možný bez znalosti programování
Možnost aktualizace firmware bez změny zapojení	U pokročilejších funkcí roste rychle obvodová složitost – klesá spolehlivost
Pokročilé funkce - počítání množství náboje v akumulátorech, odpojení zátěže v závislosti na velikosti proudu do zátěže, noční režim.	Nemožnost ovlivnění rozhodovacích mechanismů při změně zapojení a vnějších podmínek
Možnost odesílání a uchovávání naměřených dat → datalogger	Zpravidla jednoúčelový obvod pro danou aplikaci bez možnosti změny
Možnost aplikace různých algoritmů pro hledání MPP	
Možná aplikace prediktivních funkcí pro optimalizaci provozu vzhledem k změnám vnějších podmínek (noční provoz, roční období)	

Tab. 4 Srovnání vlastností procesorové a analogové verze MPPT

Analogovou verzi tvoří:

- Invertující zesilovače napětí pro snímání napětí z fotovoltaického panelu, kde se výstupní napětí nastavuje pomocí dvojice rezistorů R_1 a R_2 .
- Invertující zesilovač proudu k získávání informace o velikosti proudu z FV panelu, který se zjišťuje pomocí snímacího odporu R_s , napojeného na operační zesilovač.
- Analogová násobička (neboli multiplikátor), která slouží k vyhodnocení dvou analogových signálů ze vstupů na výstup. Je tvořena operačními zesilovači a klopnými obvody.

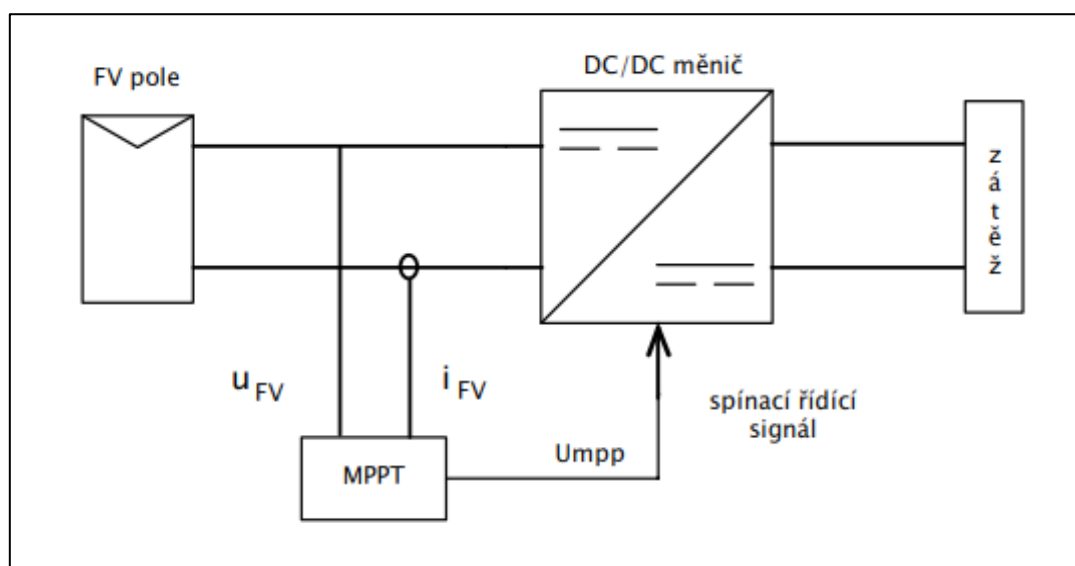
- Derivační zesilovač pro zakomponování zpětné vazby.
- Napěťový komparátor, který slouží k porovnání dvou napětí nebo proudů, které jsou přivedeny na jeho vstup.

U procesorové verze MPP trackeru tvoří hlavní základ programovatelný procesor, který se stará o veškeré funkce vyhledávače. Díky tomu, že elektronika má tendenci zlevňovat je použití procesorových MPP trackerů častější.

V poslední době se dost rozmáhá pojem solární regulátor. Solárním regulátorem může být nazván jak MPP tracker, tak PWM (Pulse Width Modulation). Obě tyto metody se dnes hojně využívají pro získání vyšších výkonů ze solárních soustav panelů.

3.2 PWM vs. MPPT

PWM je diskretní modulační pro přenos analogového signálu, kterou je u FVČ napětí. Tato modulační se hojně využívá ve výkonové elektrotechnice pro řízení velikosti napětí a proudů. PWM regulátory jsou jednoduchá elektronická zařízení a v podstatě se dá říct, že při použití v solární technice fungují jako omezovače napětí, které mají za úkol, aby vyšší napětí z FVČ nezpůsobilo destrukci baterií přebitím. Samozřejmě mají naprogramovány i různé víceúrovňové způsoby dobíjení baterií, ale největší nevýhoda je v tom, že neumí získat zpět ztracenou energii, která vzniká při omezování napětí. Pokud připojíme 12 V panel s napětím naprázdno 17 V přes PWM regulátor a zatížíme jej, že napětí klesne na úroveň baterie (10 – 14 V), tak proud se nám moc měnit nebude, ale napětí bude omezováno. Proud z FV panelu (např. 5 A) se v rozsahu 10 – 16 V nijak extrémně nemění, ovšem při vybití baterie bude PWM dodávat do článku $5 \text{ A} \cdot 10 \text{ V} = 50 \text{ W}$, při nabitější baterii $5 \text{ A} \cdot 12 \text{ V} = 60 \text{ W}$. Problém je, že panel je ve stejnou chvíli schopen dodávat vyšší výkon z bodu MPP, což je cca $4,6 \text{ A} \cdot 16,5 \text{ V} = 75,9 \text{ W}$, čímž přicházíme o podstatnou část celkového výkonu. V případě, že použijeme 60-ti článkové fotovoltaické panely, které jsou určeny pro dodávání výkonu přes střídač, jsou ztráty ještě vyšší, a proto se PWM pro tyto aplikace nedoporučuje. MPP tracker zapojený do soustavy je zobrazen na obr. 20. Pracuje jako DC – DC měnič a mikroprocesor stále zjišťuje polohu pracovního bodu a snaží se jej situovat do bodu MPP. DC - DC měnič nám transformuje napětí i proud z panelu ($4,6 \text{ A} \cdot 16 \text{ V}$) na jiné napětí a proud, kterým dobíjí baterie (např. $6,15 \text{ A} \cdot 12 \text{ V}$). V porovnání vstupujícího a vystupujícího výkonu z MPPT je snížen pouze o účinnost samotného zařízení, které se pohybuje běžně nad 93 %. Srovnání kladů a záporů mezi těmito dvěma používanými technologiemi je uvedeno v tabulce 5. [11]



Obr. 20 Zapojení MPPT do solární soustavy

	PWM	MPPT
Klady	Poloviční či třetinová cena oproti PPT	Vyšší efektivita nabíjení (zvláště v chladných klimatech)
	Statisticky delší životnost z důvodů použití méně součástek a menšímu zahřívání	Může být použito u panelů s 60 články
	Menší rozměry	Možnost zvyšovat či upravovat pole panelů
Zápory	Složitější projektování solární elektrárny vyžadující zkušenosti	Až 3x dražší než PWM
	Nemůže být efektivně použitý na velké fotovoltaické panely (60 - 72 článků)	Vzhledem k vyššímu počtu součástek a většímu zahřívání je očekávaná kratší životnost než u PWM

Tab. 5 Srovnání technologií PWM a MPPT

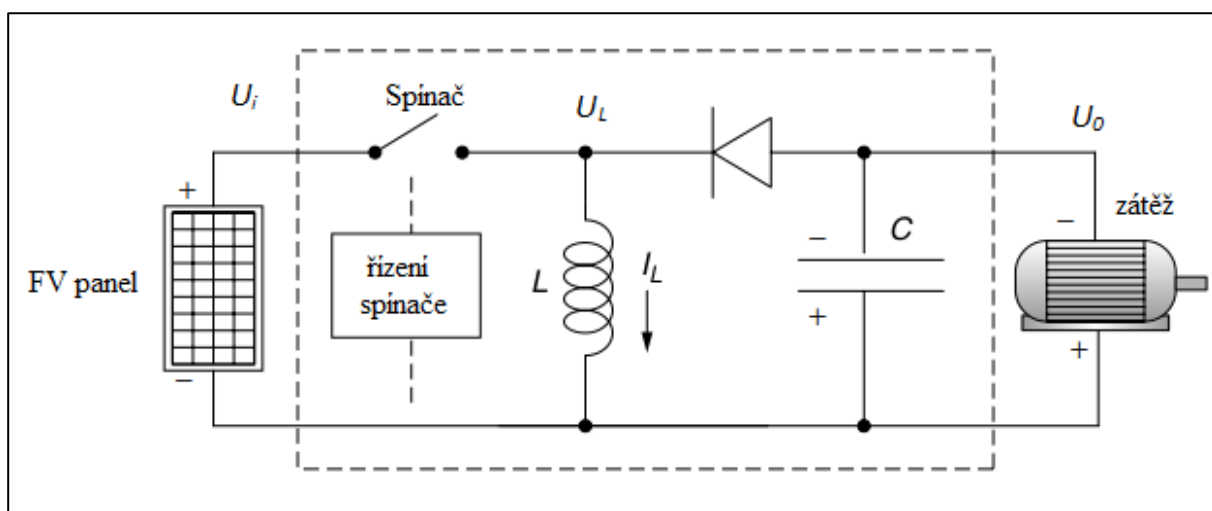
3.3 DC-DC měnič

Pro hledání bodu maximálního bodu účinnosti se v praxi využívá měřicího MPPT členu a DC-DC konvertoru. Jde o měnič, který stejnosměrné napětí a proud dodávaný z FVČ mění na jinou stejnosměrnou složku. Děje se to pomocí spínaných výkonových tranzistorů typu FET a IGBT.

Z hlediska možnosti volby existují 3 základní typy DC-DC konvertoru:

- Zvyšující měnič (Boost converter)
- Snižující měnič (Buck converter)
- Invertující měnič (Buck-Boost converter)

Výběr typu měniče závisí např. na přesném typu metody hledání MPP. Pokud se zvolí metoda, kde nejsou požadavky na předchozí znalosti o vlastnostech FV panelu, je optimální využít snižující měnič. Ovšem aby byl MPP tracker univerzálnější pro použití více metod a fungoval do více druhů zátěží (např. topná spirála, akumulátor, motor) je vhodné použít Invertující měnič, který dokáže snižovat i zvyšovat napětí na základě požadavků zátěže (obr. 21).



Obr. 21 Zapojení invertujícího měniče do zátěže

Tento typ měniče je popsán dvěma režimy – spínací prvek je sepnut a spínací prvek je rozepnut. Pokud je spínač sepnut, začne cívkou L procházet proud I_L a v ní naindukuje magnetické pole, které se následně využije při otevření spínače. Když se spínač otevře, tak začne z cívky téct proud až do doby, než její magnetické pole klesne na minimum. Tento proud I_L teče do zátěže a

do kondenzátoru, který se začne nabíjet. Cívka a kondenzátor se stanou zdrojem. Pokud je spínání tranzistoru dostatečně rychlé, tak proud I_L neklesá, je téměř konstantní a i napětí na kondenzátoru je stálé. Aby výše zmíněné situace nastaly, tak je nutné správně naddimenzovat cívku i kapacitor. Výstupní napětí U_0 je stálé a má opačnou polaritu oproti napětí U_i . Vztah mezi U_i a U_0 , neboli mezi vstupním a výstupním napětím, je řízen pracovním cyklem D . Tento pracovní cyklus nabývá hodnot od nuly do jedné. Rychlými změnami, kdy je spínač sepnut nebo rozepnut, se vytváří pulzně šířková modulace (PWM). [9]

Za předpokladu, že proud I_L je konstantní, výkon do cívky bude

$$P_{L,in} = \frac{1}{T} U_i \cdot I_L \int_0^{DT} dt = U_i I_L D \quad (3.4)$$

Při otevřeném spínači dodává cívka energii přes diodu, což znamená, že napětí na cívce U_L je stejné, jako napětí U_0 . Výkon dodaný cívkou můžeme psát

$$P_{L,out} = \frac{1}{T} \cdot \int_{DT}^T V_L \cdot I_L dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{DT}^T V_0 \cdot I_L dt \quad (3.5)$$

Pokud je obvod DC – DC konvertoru dobře navržen, je U_0 a I_L konstantní, tak výkon dodávaný cívkou

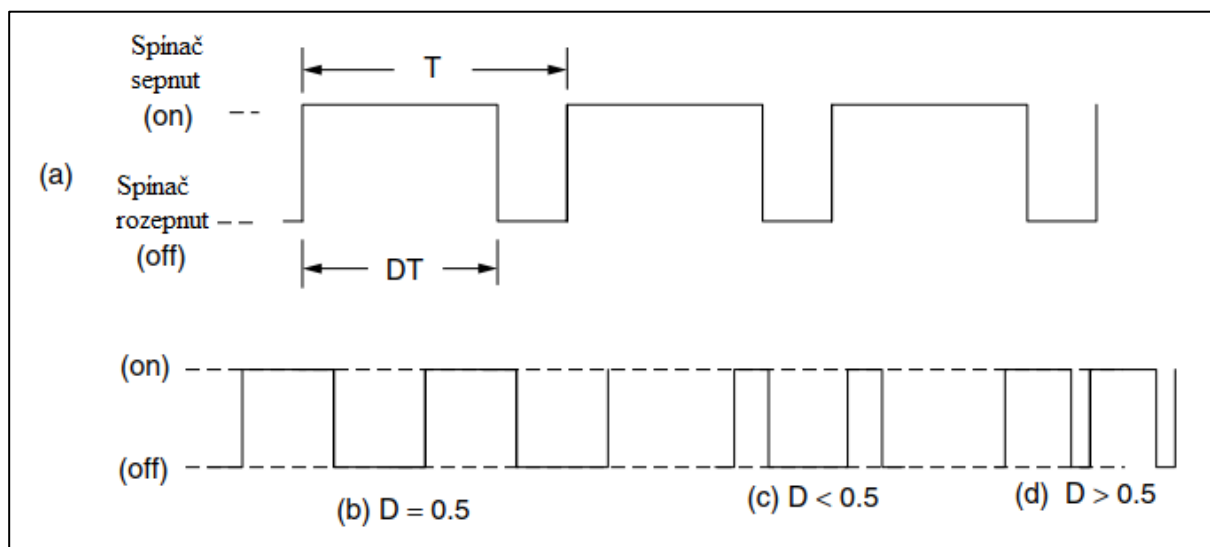
$$P_{L,out} = \frac{1}{T} \cdot \int_{DT}^T V_0 \cdot I_L \cdot (T - DT) = V_0 \cdot I_L \cdot (1 - D) \quad (3.6)$$

Pokud pracovní cyklus není omezen, tak výkon dodávaný do cívky se rovná výkonu z ní vystupujícímu, tak z rovnic 3.4 a 3.6 dostaneme

$$\frac{U_0}{U_i} = \left(\frac{D}{1 - D} \right) \quad (3.7)$$

Z rovnice 3.7 můžeme vidět, že DC – DC konvertor může napětí zvyšovat či snižovat na základě délky pracovního cyklu (střídý). Širší střída nám zajistí více nabitý kondenzátor a menší čas k vybití, z čehož plyne, že výstupní napětí je tím vyšší, čím je širší střída.

Pokud je střída D rovna právě jedné polovině, má napětí na výstupu stejné napětí jako na vstupu. Střída rovná dvou třetinám znamená dvojnásobné napětí na výstupu. Střída rovná jedné třetině sráží vstupní napětí na výstupu na polovinu.



Obr. 22 Spínání pracovního cyklu D [9]

3.3.1 Příklad výpočtu střídý

FV panel, který má nejvyšší dodávané napětí $U_m = 17 \text{ V}$, dodávaný proud $I_m = 6 \text{ A}$ a bude pracovat do 10Ω zátěže. Maximální výkon dodávaný článkem je

$$P = U_m \cdot I_m = 17 \cdot 6 = 102 \text{ W} \quad (3.8)$$

Bude potřeba do zátěže dodat

$$P = \frac{U_R^2}{R} = 102 = \frac{U_R^2}{R} \quad (3.9)$$

$$U_R = \sqrt{102 \cdot 10} = 31,9 \text{ V} \quad (3.10)$$

DC – DC konvertor musí zvýšit napětí z 17 V na požadovaných $31,9 \text{ V}$. Pomocí rovnice 3.7 můžeme počítat

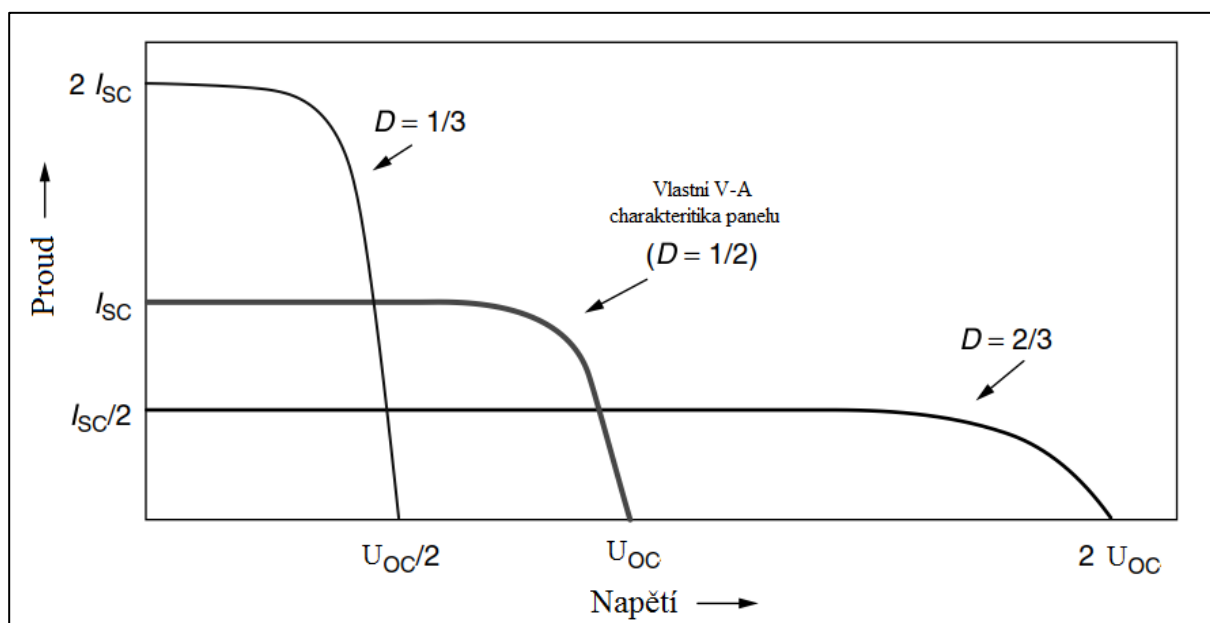
$$\frac{31,9}{10} = \left(\frac{D}{1-D} \right) = 1,88 \quad (3.11)$$

$$D = 1,88 - 1,88D \quad (3.12)$$

$$D = \frac{1,88}{2,88} = 0,65 \quad (3.13)$$

Potřebná délka střídý pro daný panel pracující do odporové zátěže je $0,65$. [9]

Na obr. 23 je zobrazená V-A charakteristika panelu ovlivněná MPP trackerem. Bod MPP se nachází v pomyslném kolenu každé charakteristiky.



Obr. 23 V-A charakteristiky panelu s MPPT a třemi pracovními cykly [9]

3.4 Rozdělení metod MPPT

V základu se metody dělí na přímé a nepřímé.

Přímé:

- **Perturb & Observe** (sledování změny výkonu)
 - **Incremental Conductance** (přírůstková vodivost)
- (kap. 3.5)

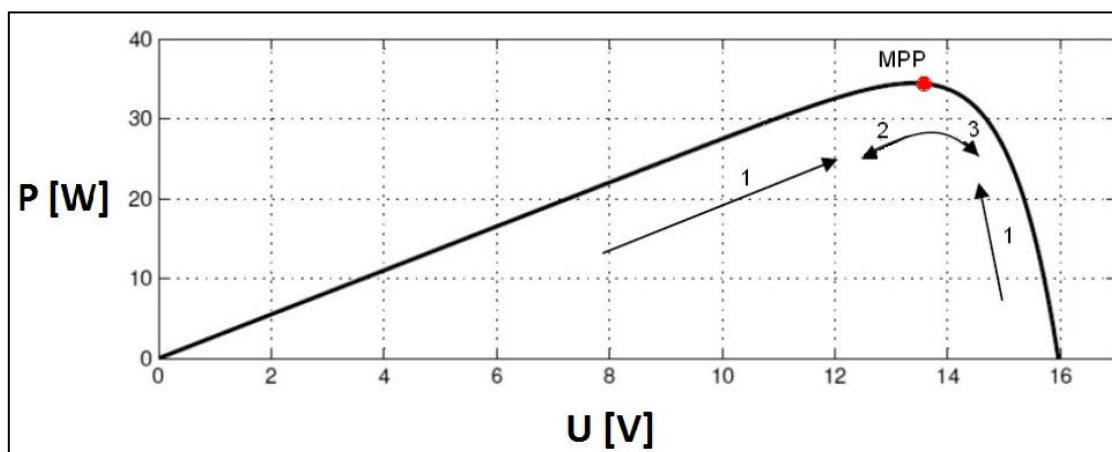
Nepřímé:

- **Fractional Open Circuit Voltage** (částečné napětí naprázdno)
 - **Fractional Short-Circuit Current** (částečný proud nakrátko)
 - **Fixed voltage** (stálého napětí)
- (kap. 3.6)

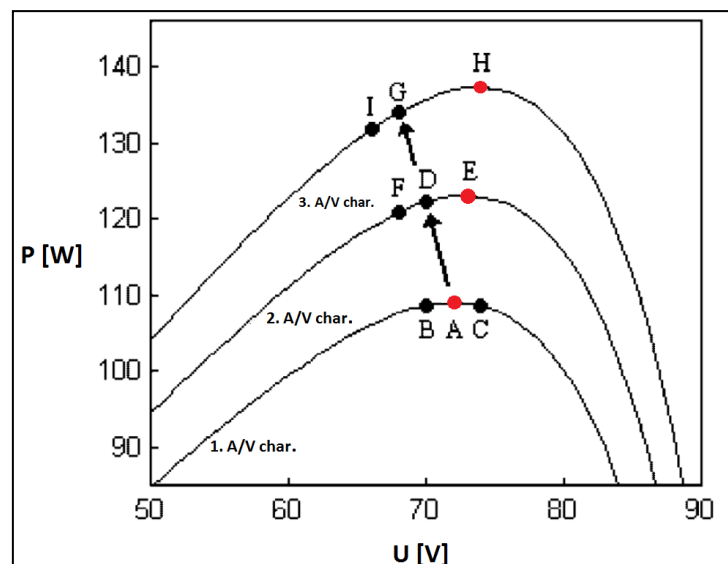
3.5 Přímé metody MPPT

3.5.1 Perturb & Observe (P&O)

Výkon systému se u této metody řídí malou změnou napětí. Pokud výkon naroste, tak systém udělá další změnu ve stejném směru (na obr. 24 můžeme sledovat jako krok 1). Jakmile je však dosaženo maximálního bodu výkonu, pak už výkon jen klesá. Je tedy nutné, aby proběhla změna napětí v opačném směru (krok 2). Tím se dostaneme ke kroku 3 a následně jen opakujeme kroky 2 a 3 a tím zajistíme, že se náš pracovní bod bude pohybovat okolo MPP. Je jasné, že tím, že bod je sledován a pohybuje se okolo něj, tak dochází ke ztrátám, protože je téměř vždy odchýlen od tohoto bodu. Tento stav musí být regulován tím, že při opakování kroků 2 - 3 při stejném osvětlení se bude zmenšovat jeho krok, čímž vlastně korigujeme velikost odchýlení od bodu, a naopak tuto velikost budeme zvětšovat, pokud se osvětlení změní. Reakce na změnu osvětlení bohužel není okamžitá, proto bude tato problematika probrána podrobněji na obrázku 25.

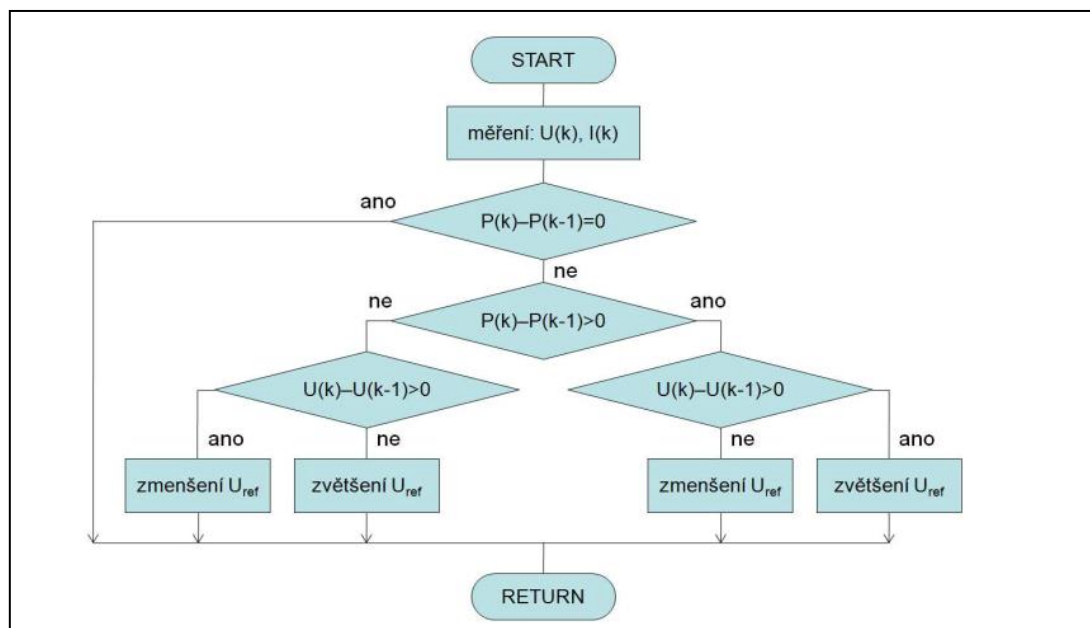


Obr. 24 Princip sledování MPP bodu



Obr. 25 Sledování bodu MPP při změně osvětlení

V první A/V charakteristice PB osciluje okolo bodu A ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$). Vzroste-li míra osvětlení, která dopadá na FV článek tak dojde ke zvýšení okamžitého výkonu a plánovaný posun z MPP bodu A do B v 1. A/V charakteristice se posunuje z bodu D do F, který je umístěný v 2. A/V charakteristice, kde teprve zjišťuje nárůst výkonu. Následně změni napětí v opačném směru a bude směřovat do nového MPP bodu E. Pokud opět během této operace naroste záření dopadající na panel, výkon vzroste na úroveň bodu G a bude pokračovat stejnou změnou napětí a tím dosáhne bod I, kde nastane záporný rozdíl výkonů a postupně dosáhne MPP bodu H v 3. A/V charakteristice. Algoritmus pro funkci P&O metody můžeme vidět na obr. 26.



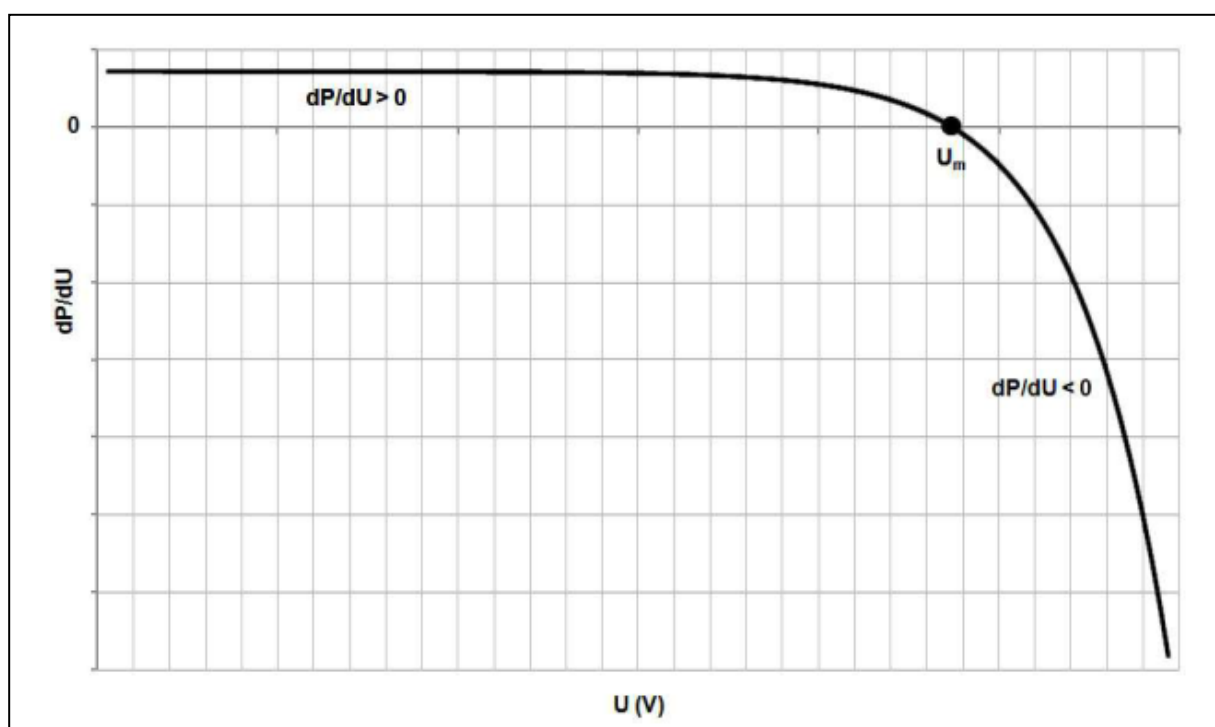
Obr. 26 Vývojový diagram P&O [8]

3.5.2 Incremental Conductance

Incremental conductance, neboli česky metoda přírůstkové vodivosti, pracuje na principu měření vodivosti a vychází z toho, že směrnice derivace výkonové charakteristiky FV článku je nulová, kladná anebo záporná. Poskytuje lepší výkon při rychle se měnících atmosférických podmínkách (míra osvětlení, teplota). Ovšem tohle je „vykoupeno“ vyšší složitostí algoritmu a je nutné mít výkonnější hardware, než např. u metody P&O. Výhody této metody nejlépe vyniknou u rozsáhlých fotovoltaických systémů.

Logika posouvání MPP bodu:

$$\begin{aligned}\frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} &= 0 \rightarrow \text{Pracovní bod je v MPP} \\ \frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} &< 0 \rightarrow \text{Pracovní bod je napravo od MPP} \\ \frac{dP}{dU} \cong \frac{\Delta P}{\Delta U} &> 0 \rightarrow \text{Pracovní bod je nalevo od MPP}\end{aligned}\tag{3.14}$$



Obr. 27 Hodnota a směrnice výkonu podle napětí [8]

Diferenciální zápis dP/dU :

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(U \cdot I)}{dU} = I + U \cdot \frac{dI}{dU} \cong I + U \cdot \frac{\Delta I}{\Delta U} = 0 \quad (3.15)$$

Při platnosti vztahu (3.15) lze vztahy (3.14) přepsat na

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U} &\rightarrow \text{Pracovní bod je v MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U} &\rightarrow \text{Pracovní bod je napravo od MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} &\rightarrow \text{Pracovní bod je nalevo od MPP} \end{aligned} \quad (3.16)$$

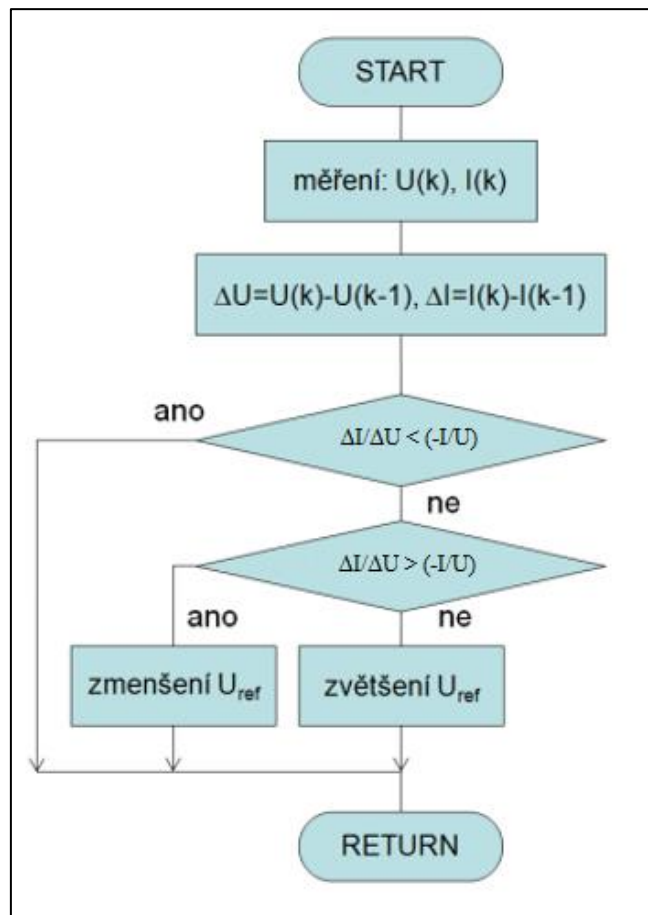
Pokud je splněna podmínka rovnosti v rovnici 3.16, znamená to, že pracovní bod může zůstat bez změny. Pokud tato podmínka není splněna, musí být pracovní bod posunut.

Poloha bodu maximálního výkonu je pak vyhledávána pouhým porovnáním přírůstkové a okamžité vodivosti:

$$G = \frac{I}{U} \quad (3.17)$$

$$\Delta G = \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (3.18)$$

Zvýšením či snížením pracovního napětí se dosahuje posunu pracovního bodu. Velikost přírůstku určuje, jak rychle se bod MPP nalezne. Rychlého dosledování bodu je možné pomocí velkých přírůstků, ale pak systém osciluje okolo bodu MPP. Volba vhodného přírůstku je tudíž důležitá pro rychlost programu. Algoritmus této metody je znázorněn na obrázku 28.



Obr. 28 Algoritmus metody přírůstkové vodivosti [8]

3.6 Nepřímé metody

3.6.1 Fractional Open-Circuit Voltage

Tato metoda (napětí naprázdno) využívá téměř lineárního vztahu mezi napětím U_{mpp} a napětím naprázdno fotovoltaiického článku – U_{oc} a to při různých změnách intenzity ozáření a teploty. Vztah je dán rovnicí:

$$U_{mpp} \approx k_1 \cdot U_{oc} \quad kde \ 0,71 < k_1 < 0,78 \quad (3.19)$$

Konstanta k_1 je závislá na typu a vlastnostech použitého fotovoltaiického panelu. Nevýhodou ovšem je, že napětí naprázdno U_{oc} jsme schopni měřit pouze v okamžiku, kdy je vypnuto napájení měniče, čímž dojde ke chvilkové ztrátě výkonu. Napětí, které se generuje na přechodu PN je cca 75 % U_{oc} , tím můžeme eliminovat měření napětí naprázdno a výpočtu U_{mpp} . Jakmile se U_{mpp} přiblíží, uzavřená smyčka měniče může být použita k dosažení požadované hodnoty napětí. Metoda napětí naprázdno je pouze orientační a pracovní bod nepůsobí přímo v MPP. Větší problémy zde způsobuje částečné zastínění. Na druhou stranu je ovšem velmi jednoduchá, nenáročná a snadno se zavádí, protože nepotřebuje mikropočítač pro ovládání a lze ji sestavit analogovou formou pomocí jednoho napěťového senzoru.

3.6.2 Fractional Short-Circuit Current

Metoda částečného proudu nakrátko využívá podobně jako částečné napětí nakrátko téměř lineární závislosti proudu I_{mpp} a proudu nakrátko I_{sc} při změnách teplot a ozáření článku.

Závislost je dána vztahem:

$$I_{mpp} \approx k_2 \cdot I_{sc} \quad kde \quad 0,78 < k_2 < 0,92 \quad (3.20)$$

Kde konstantu k_2 musíme určit z charakteristiky FVČ. Měření proudu nakrátko během provozu je problematické. Elektronický obvod musí obsahovat přepínač, který je obvykle umístěn do výkonového měniče a ten v pravidelných intervalech spojuje FV pole nakrátko, aby mohl být proud nakrátko změřen. Tím se samozřejmě zvyšuje cena soustavy, jelikož jsou potřebné další komponenty. Většina systému, které tuto metodu využívá, tak potřebují být řízené procesorem. Často bývá tato metoda také kombinována s metodou Fractional Open-Circuit Voltage.

3.6.3 Fixed voltage

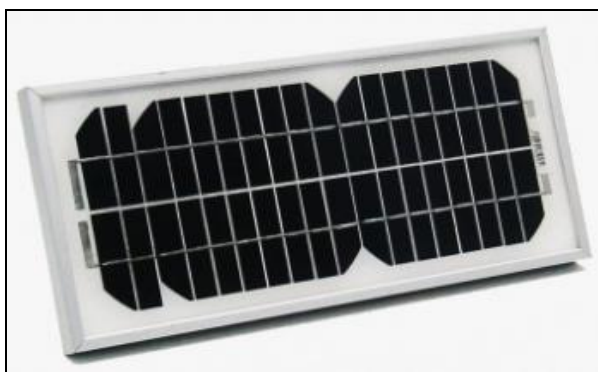
Metoda stálého napětí je založena na přizpůsobování napětí na základě ročního období. Očekávané vyšší napětí (U_{mpp}) je v zimě a nižší přes léto. Tato metoda není přesná a nejlépe funguje na místech, kde je stálý sluneční svit.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Fotovoltaické panely

V laboratoři byly k dispozici 3 typy fotovoltaických panelů.

➤ Monokrystalický panel Rich Solar



Obr. 29 Fotovoltaický panel RS-M5

Typ	RS-M5
Výkon (P_m)	5Wp
Proud nakrátko (I_{sc})	320mA
Napětí naprázdno (U_{oc})	21,96V
Nominální napětí (U_{mp})	17,82V
Nominální proud (I_{mp})	290mA

Tab. 6 Parametry FVČ Rich Solar

Šířka [mm]	360
Výška [mm]	165
Hloubka [mm]	25

Tab. 7 Rozměry FVČ Rich Solar

➤ Polykrystalický panel Conrad



Obr. 30 Fotovoltaický panel SPS10W-12V

Typ	10W-12V
Výkon (Pm)	10Wp
Proud nakrátko (Isc)	610mA
Napětí naprázdno (Uoc)	21,6V
Nominální napětí (Ump)	17,6V
Nominální proud (Imp)	570mA

Tab. 8 Parametry FVČ Conrad

Šířka [mm]	356
Výška [mm]	301
Hloubka [mm]	28

Tab. 9 Rozměry FVČ Conrad

➤ Amorfnní panel Konarka



Obr. 31 Fotovoltaický panel Konarka 120

Typ	20 series
Výkon (Pm)	8Wp
Proud nakrátko (Isc)	199mA
Napětí naprázdno (Uoc)	11,1V
Nominální napětí (Ump)	8V
Nominální proud (Imp)	159mA

Tab. 10 Parametry FVČ Konarka 120

Šířka [mm]	332
Výška [mm]	273
Hloubka [mm]	1

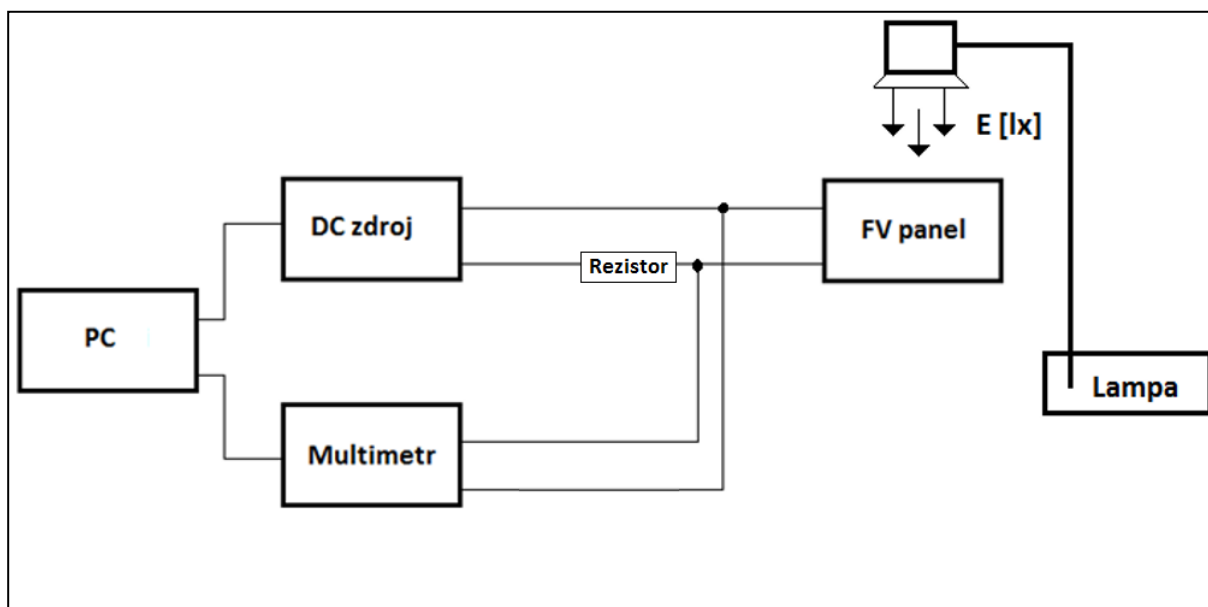
Tab. 11 Rozměry FVČ Konarka 120

4.2 Programování v prostředí HP VEE

Program VEE byl speciálně vyvinut inženýry od firmy HP v roce 1991. Jedná se grafické vývojové prostředí pro programování, které zajišťuje měření, analýzu, reportování i prezentaci naměřených a analyzovaných dat. Umí pracovat s napájecími zdroji, osciloskopy, multimetry, generátory signálů a spolupracuje s nimi v reálném čase. Programuje se pomocí blokových schémat. Pomocí tohoto programu byl sestaven základní program pro naměření V-A charakteristik a následně naprogramovány metody MPPT Perturb and Observe a Incremental Conductance. Po připojení měřicích přístrojů, proběhla jejich synchronizace a následně byly vytvořeny programy pro jednotlivé měřicí úlohy.

4.3 Měření V-A charakteristik panelů

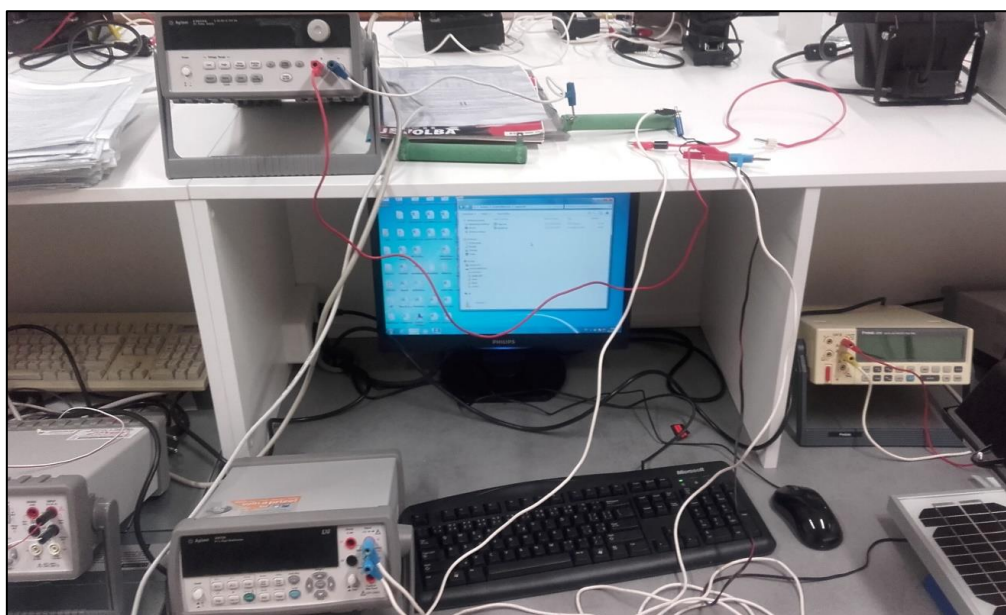
V laboratoři pomocí měřicích přístrojů, které jsou uvedené v tabulce č. 12 bylo vytvořeno zapojení, které je schematicky zobrazeno na obr. 32. Fotka reálného zapojení vytvořeném v laboratoři na základě nákresu (obr. 32) je zobrazeno na obr. 33.



Obr. 32 Zapojení měřicího pracoviště pro měření FV panelů

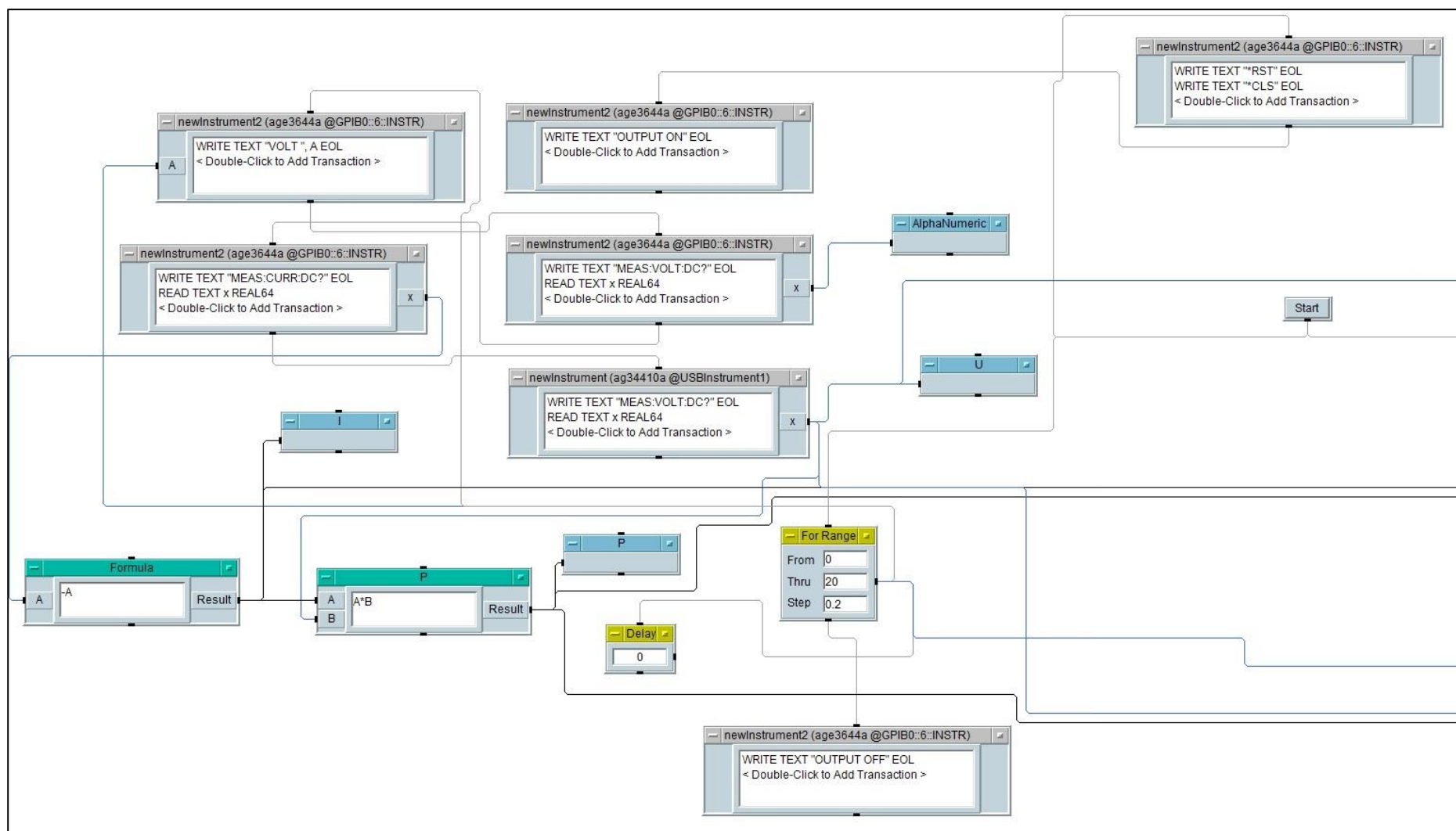
Přístroj	Typ	Výrobce
Polykrystalický FV článek	SPS10W-12V	Conrad Electronic SE
Monokrystalický FV článek	RS-M5 5Wp	Rich Solar
Amorfní FV článek	Series 20	Konarka
Zdroj 0-20VDC	E3644A	Agilent
Multimetr	34410A	Agilent
Rezistor	6R7 - 100W	-
Svítlidlo	Flood Light 751 500W	Land lite

Tab. 12 Použité přístroje pro měření V-A charakteristik

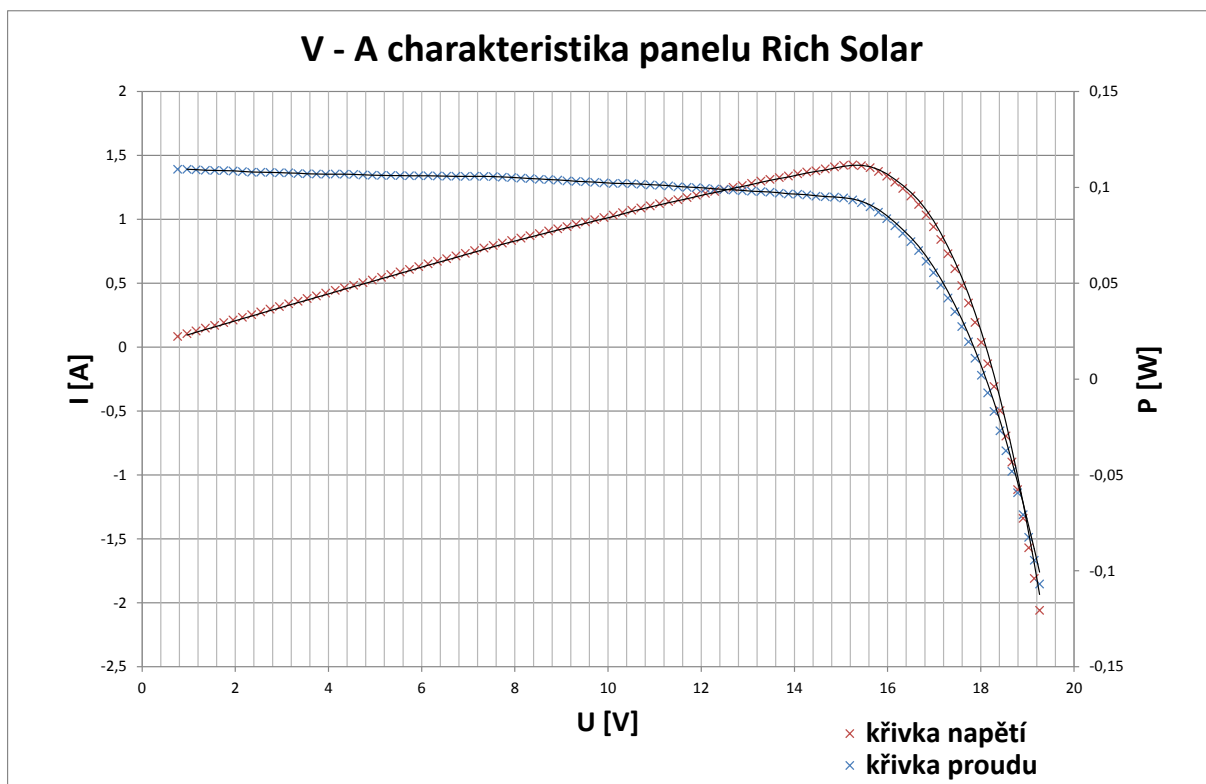


Obr. 33 Fotka zapojení v laboratoři

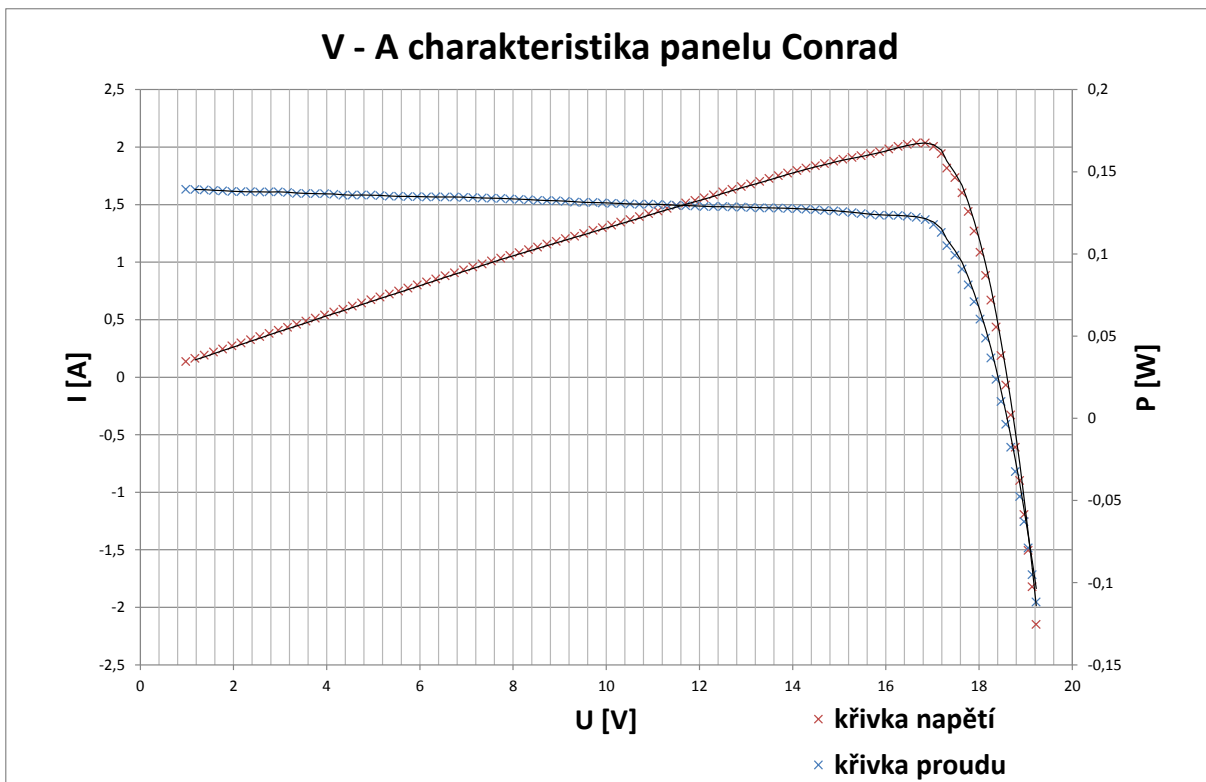
Pomocí výše zmiňovaného programového prostředí VEE byl vytvořen základní program na proměření V-A charakteristik všech 3 typů FV panelů. Blokové schéma je uvedeno na obr. 34 a výsledné charakteristiky na obr. 35-37. Celý cyklus byl řízen blokem For Range a proměřovalo se od 0 do 20 V s krokem 0,2 V. Ostatní bloky v horní části schématu nastavují měřicí přístroje, aby byly schopny nastavovat a číst napětí a proudy. Ve spodní části je umístěn blok Formula, který otáčí směr proudu a blok P vypočítává výkon z naměřeného napětí a proudu. V pravé části schématu, která není uvedena na obrázku, je pouze graf V-A charakteristiky a pokyny pro zapisování hodnot do excelu.



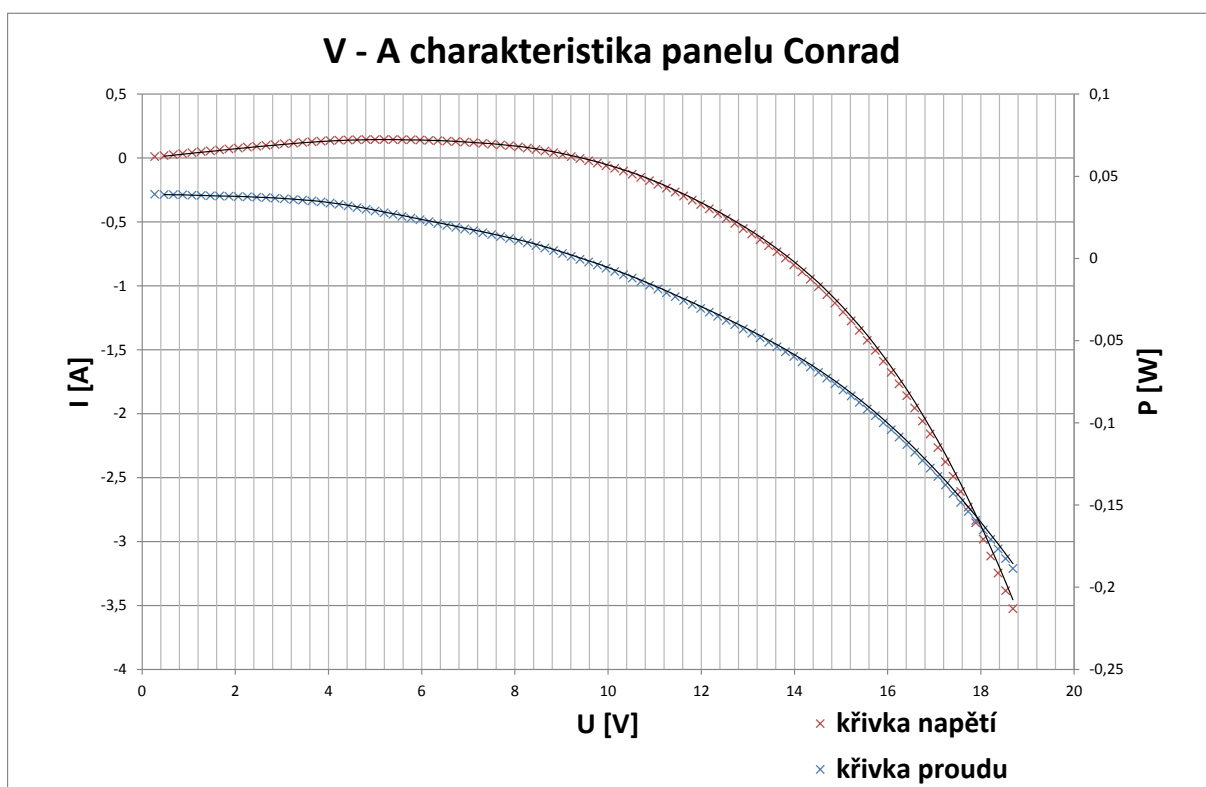
Obr. 34 Blokové schéma programu pro naměření V-A charakteristik



Obr. 35 Naměřená V-A charakteristika panelu Rich Solar



Obr. 36 Naměřená V-A charakteristika panelu Conrad



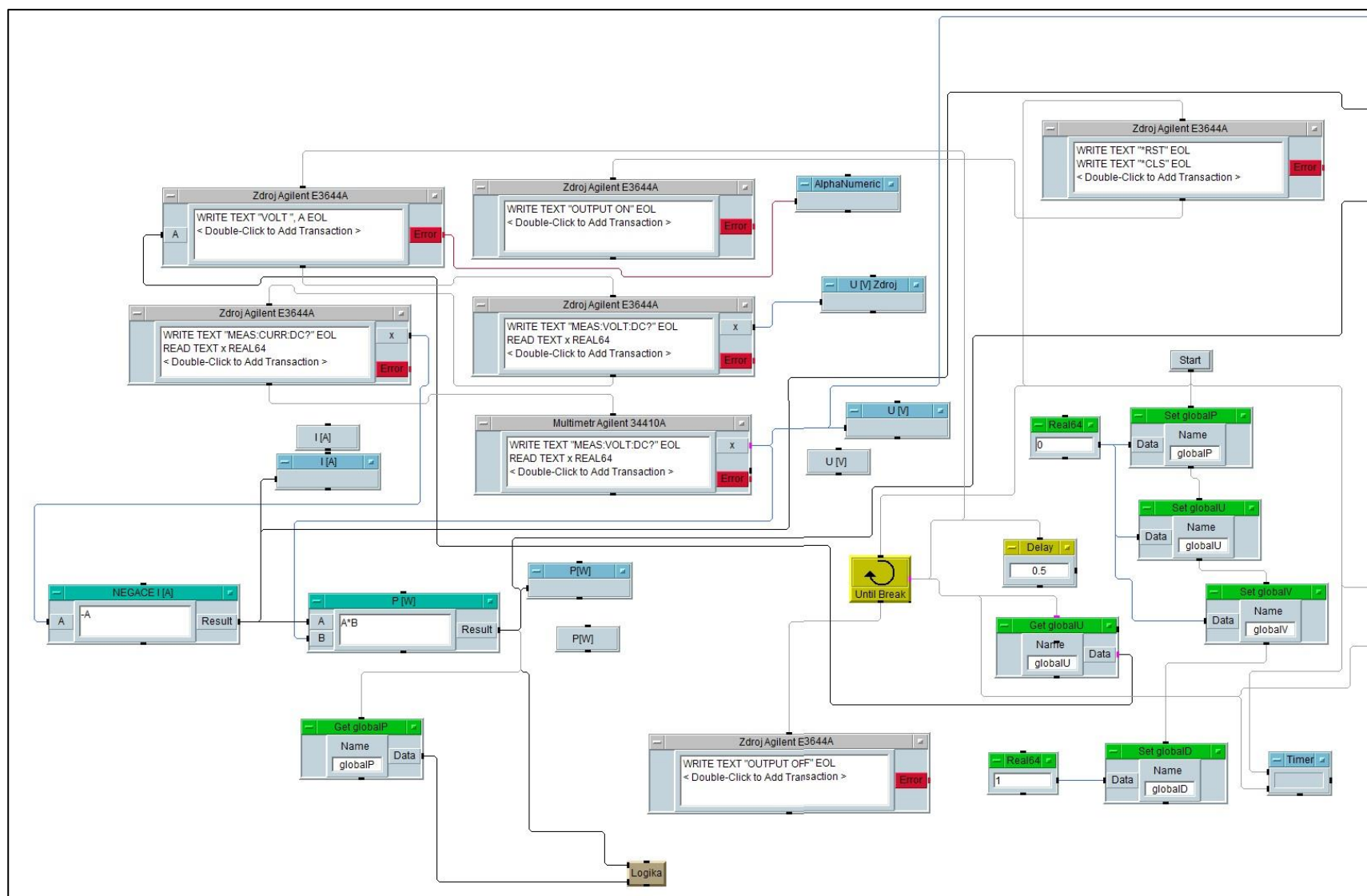
Obr. 37 Naměřená V-A charakteristika panelu Konarka

4.4 Aplikace metody Perturb and Observe

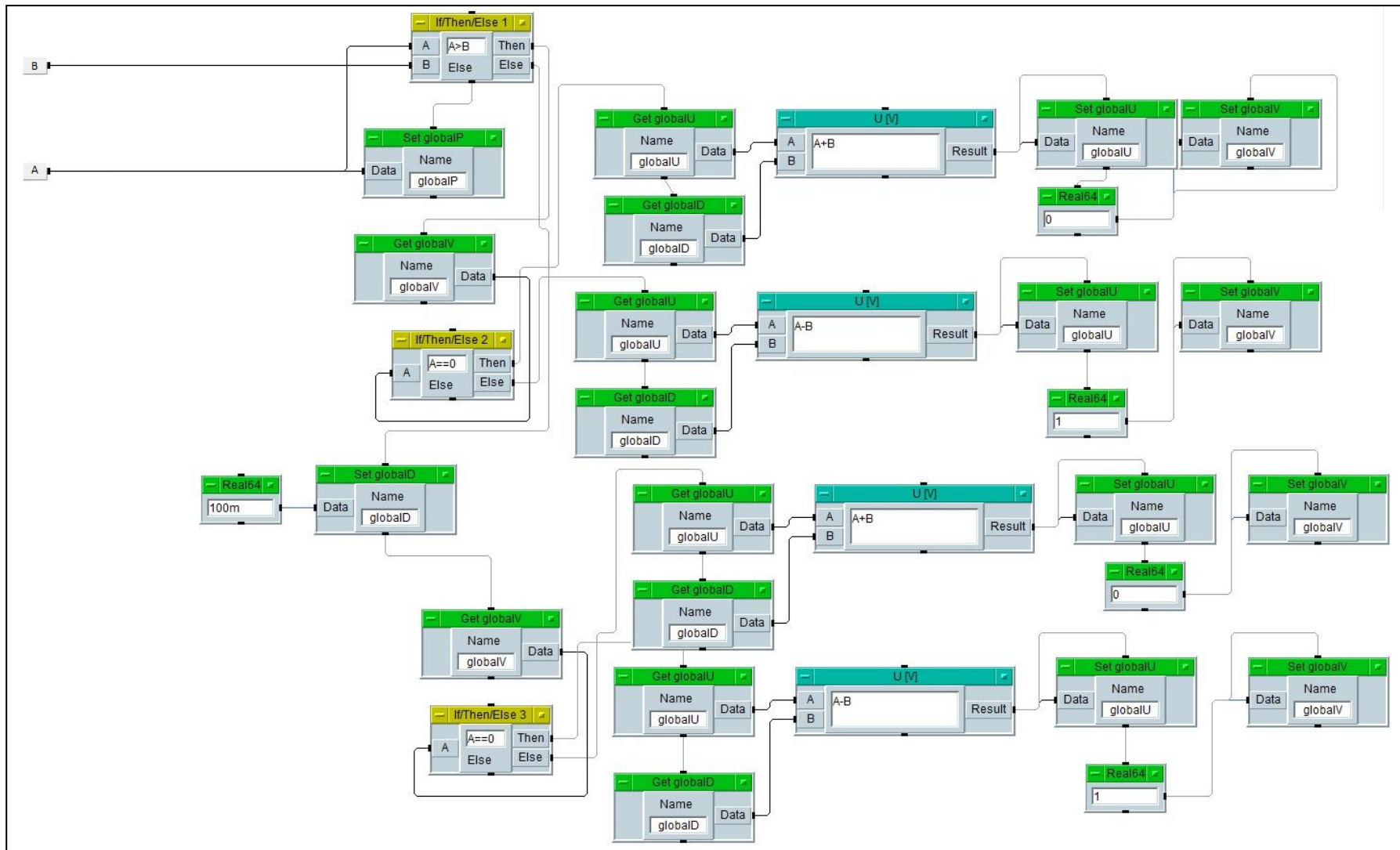
Na základě algoritmu metody Perturb and Observe, který byl popsán v teoretickém rozboru na obr. 26, bylo blokové schéma pro měření V-A charakteristiky rozšířeno a upraveno, aby splňovalo funkce metody. Přesněji řečeno byly přidány globální proměnné, do kterých se ukládali důležité hodnoty z měření. Pomocí porovnávání aktuálně naměřených hodnot s hodnotami uložených v proměnných byla vytvořena řídicí logika programu, jejíž detail je umístěn na obr. 39.

V této logice jsou 4 rozhodovací větve, které určují, jestli se bude napětí U_{ref} snižovat či zvyšovat, abychom dosáhli co nejvyššího výkonu z panelu. K realizaci postačili 4 proměnné - P, U, V, D. Globální proměnná V nabývá hodnot 0 nebo 1 a určuje, jestli se bude U_{ref} zvyšovat nebo snižovat. Pokud obsahuje 0, aktuální výkon se nachází nalevo od MPP a U_{ref} musí být zvýšeno a když obsahuje 1, bude se nastavované napětí snižovat. Do proměnné U se ukládá hodnota napětí, které se bude nastavovat. D značí napěťový krok, s jakým bude metoda pracovat. Pro rychlé dosažení okolí bodu MPP byl krok nastaven na 1 V až do té doby, než výkon začne klesat, což značí, že se aktuální výkon dostane za bod MPP. Následně byl krok automaticky nastaven na 0,1 V, aby mohl lépe oscilovat okolo bodu maximálního výkonu. V proměnné P je uložena aktuální hodnota výkonu, která se porovnává s výkonem předchozím. Rozhodovací člen IF/THEN/ELSE 1 porovnává výkon, jestli je vyšší nebo nižší než výkon předchozí, další rozhodovací členy IF/THEN/ELSE 2 a IF/THEN/ELSE 3 obsahují stejnou podmínku, kde se porovnává napětí z proměnné V a rozhoduje o tom, zda se bude napětí přičítat nebo odečítat.

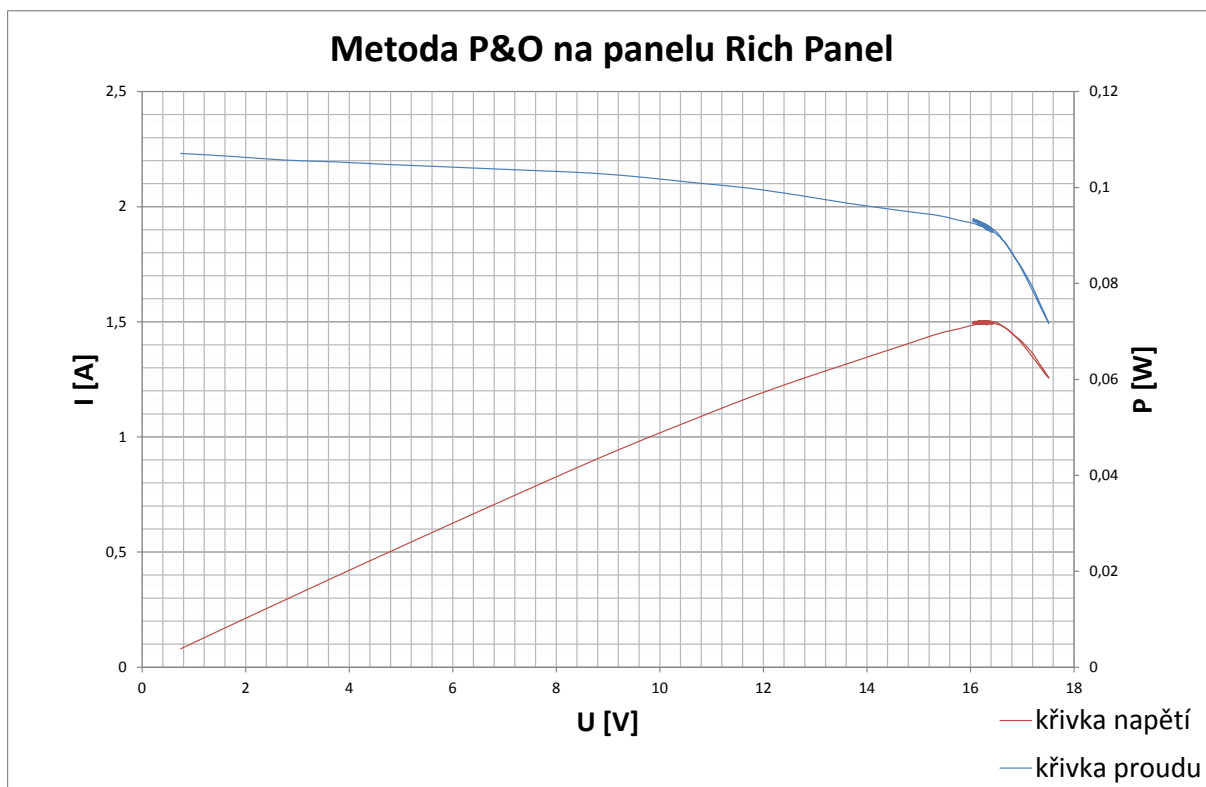
Metoda byla aplikována na všechny 3 typy panelů, které byly k dispozici. Výsledky a současně ověření funkčnosti této metody je zobrazeno na obr. 40 – 42. Na těchto grafech si lze povšimnout nárůstu výkonu k bodu MPP, následného překročení bodu a nakonec oscilace okolo něj.



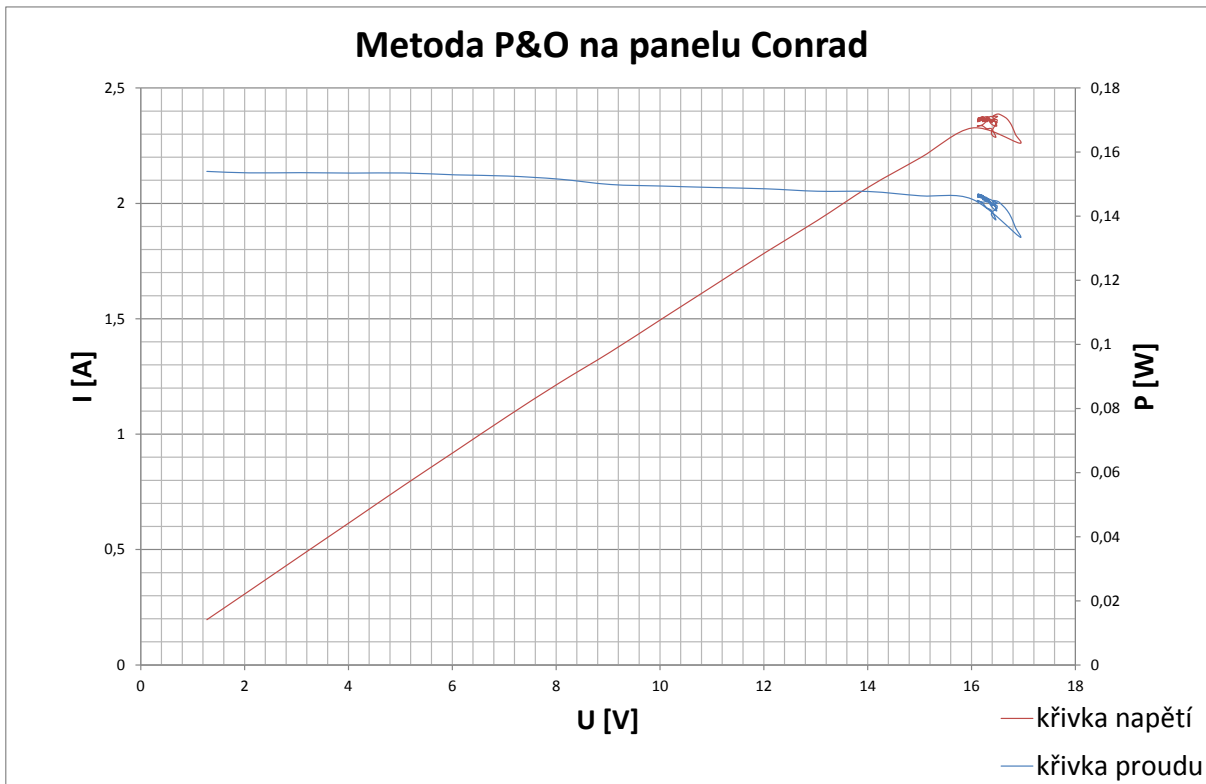
Obr. 38 Blokové schéma v programu VEE pro metodu Perturb and Observe



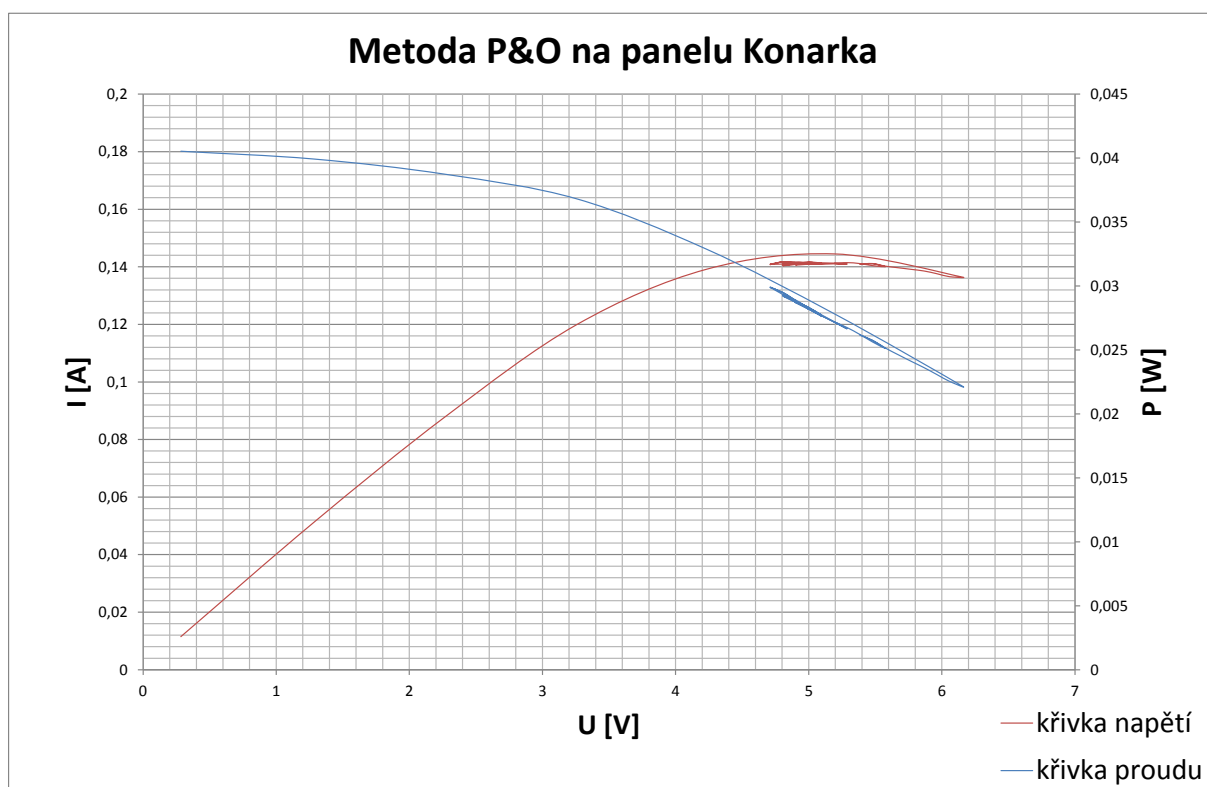
Obr. 39 Logika algoritmu Perturb and Observe



Obr. 40 Metoda P&O aplikovaná na panelu Rich



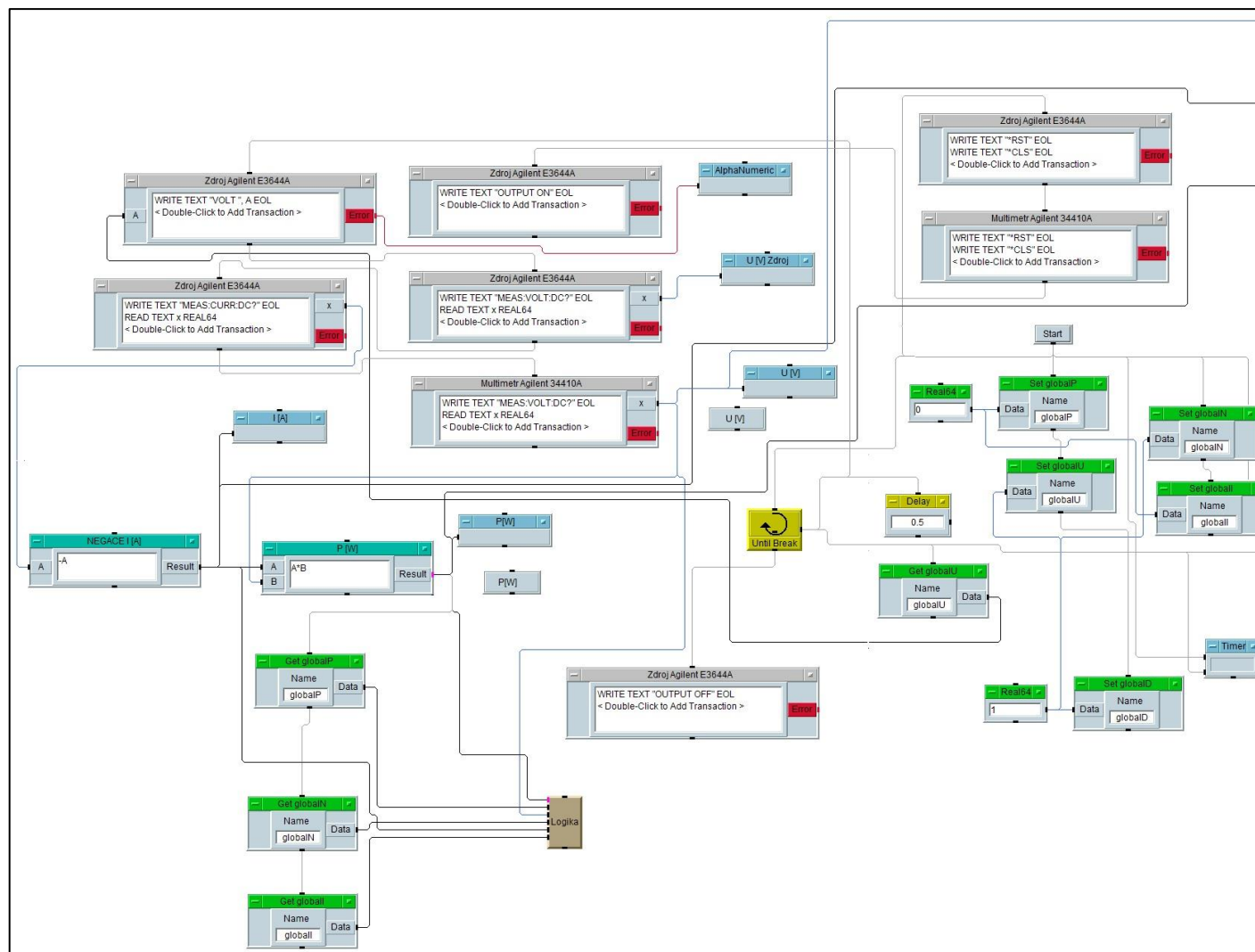
Obr. 41 Metoda P&O aplikovaná na panelu Conrad



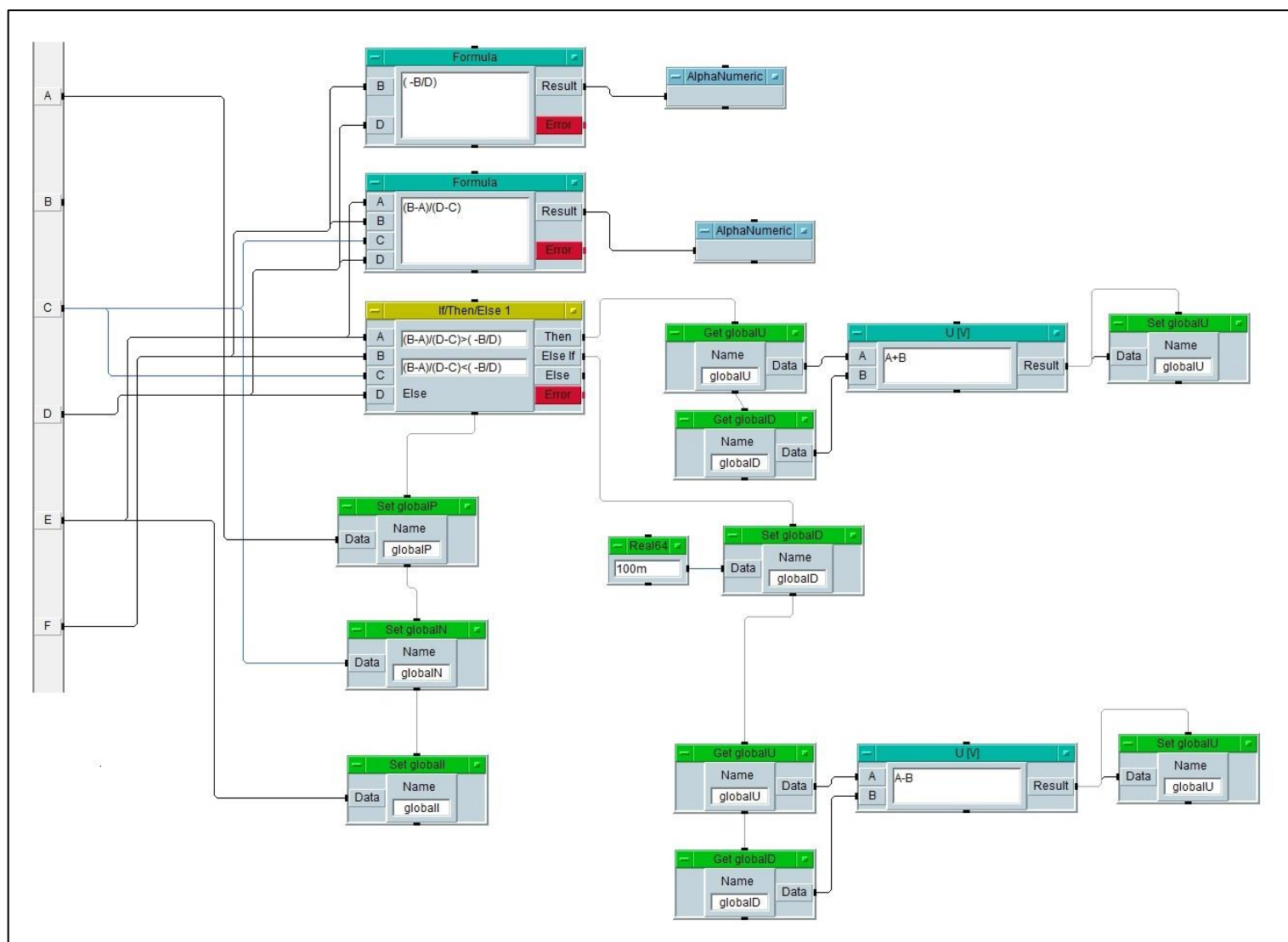
Obr. 42 Metoda P&O aplikovaná na panelu Konarka

4.5 Aplikace metody Incremental Conductance

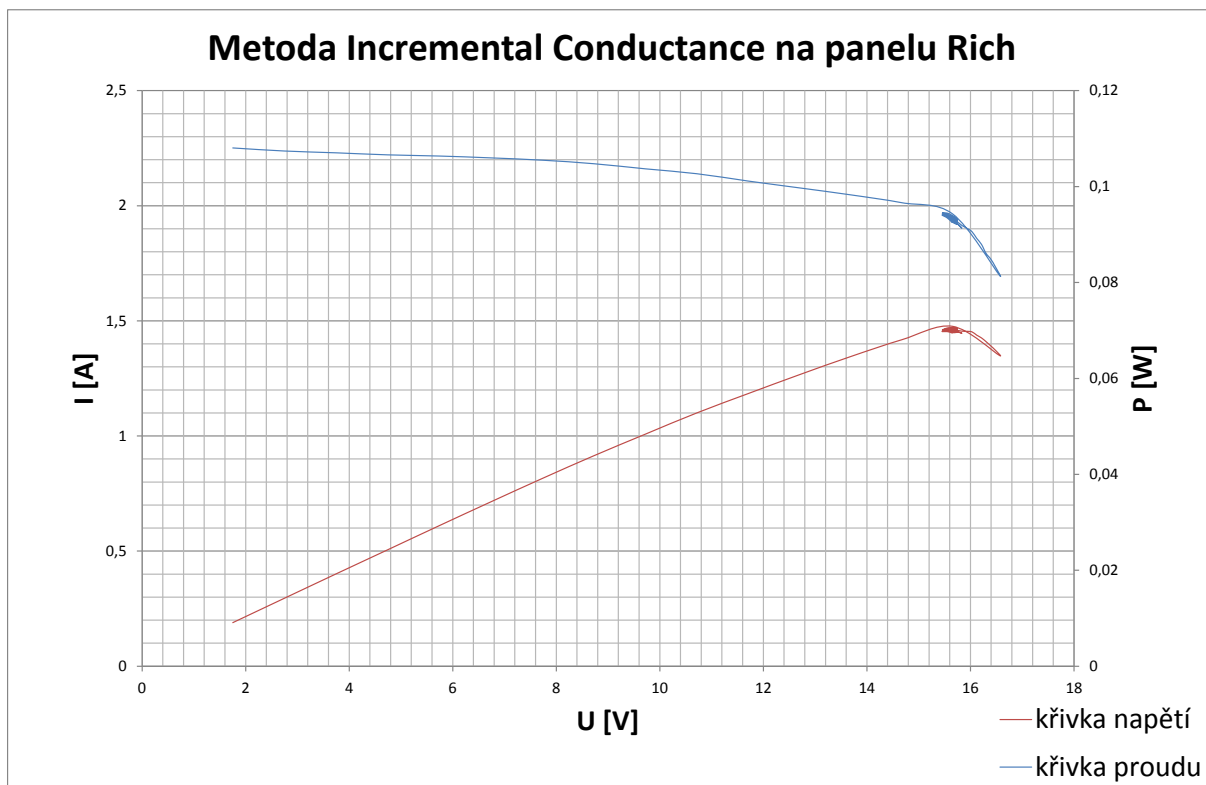
Programování metody přírůstkové vodivosti bylo založeno na jejím algoritmu, který je zobrazen na obr. 28. Pracovní bod byl opět posouván díky řízení referenčního napětí U_{ref} . Toto napětí je v algoritmu řízeno globální proměnou U . Globální proměnné použité u této metody byly U , D , N , I . V proměnné U je napětí, které se bude nastavovat, v D je hodnota aktuálního napětí, v N je předchozí hodnota napětí a v I je předchozí hodnota proudu. Hodnoty do těchto proměnných se vždy zapíše, až se program dostane za rozhodovací člen IF/THEN/ELSE 1. V blokovém schématu je uvedena i proměnná P , do které se zapisuje výkon, ovšem tato proměnná není pro chod programu důležitá a slouží jen k zobrazení. Tato metoda je jednodušší, protože obsahuje pouze jeden rozhodovací člen a 2 větve programu. Ovšem podmínka v něm je složitější než u metody P&O. V tomto členu se porovnávají indukance, přesně tak, jak je zobrazeno v algoritmu v teoretické části (obr. 28). Dva bloky nahoře v detailu logiky u této metody, nejsou pro chod programu důležité, ale sloužili jen pro zobrazování vodivosti. Celé schéma je zobrazeno na obr. 43 a detail rozhodovací logiky je pro přehlednost umístěn na obrázku následujícím.



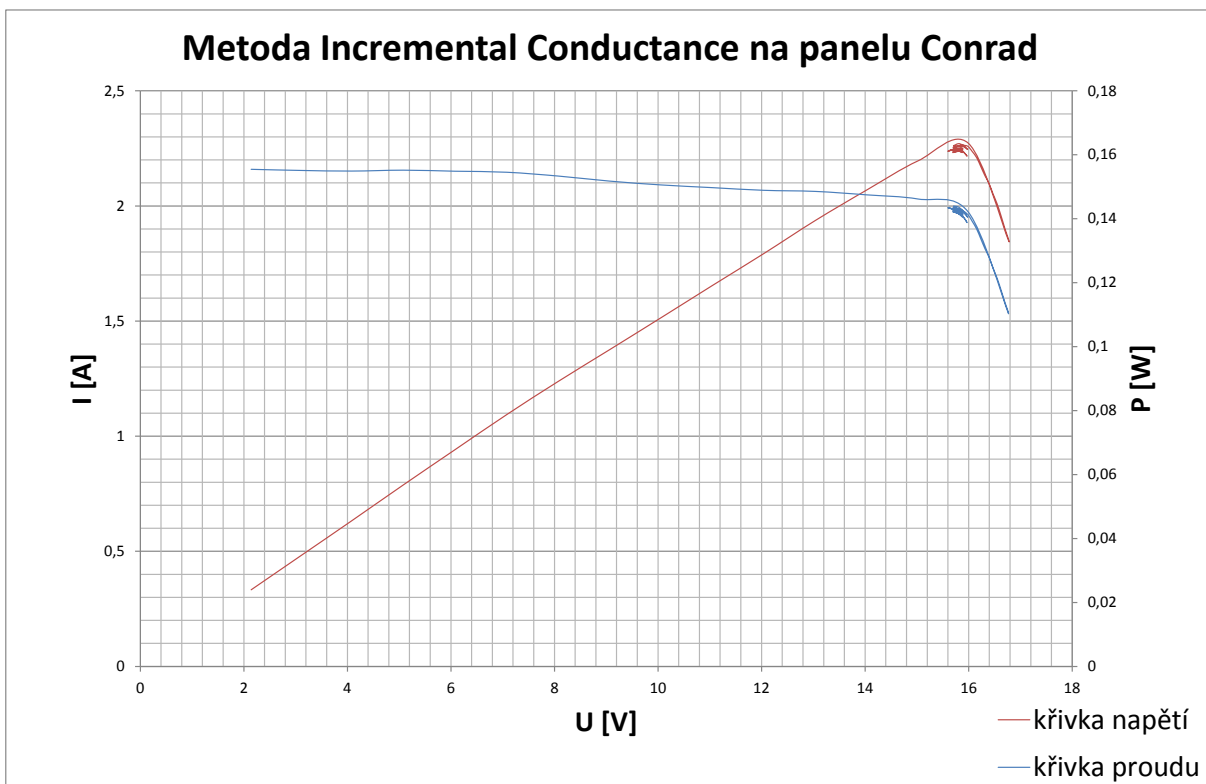
Obr. 43 Blokové schéma v programu VEE pro metodu přírůstkové vodivosti



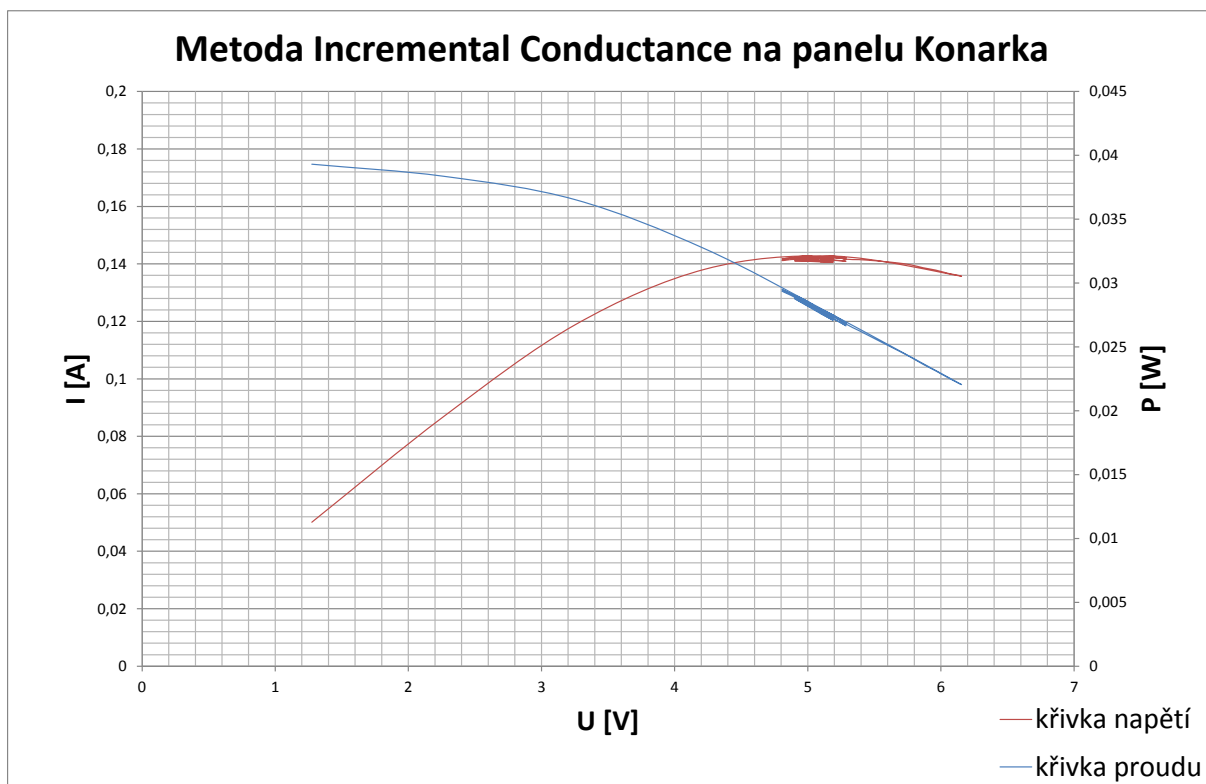
Obr. 44 Logika algoritmu přírůstkové vodivosti



Obr. 45 Metoda IC aplikovaná na panelu Rich



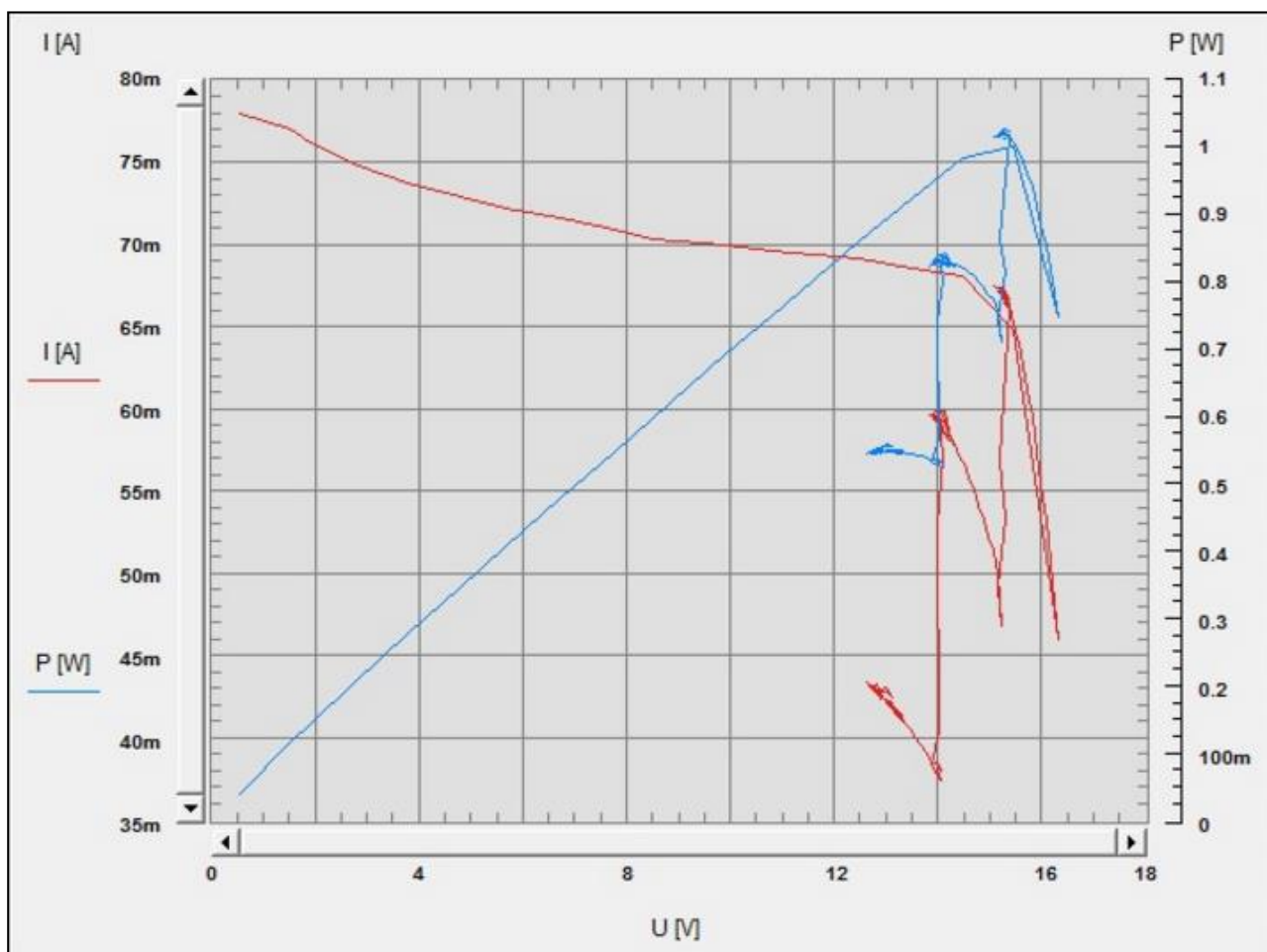
Obr. 46 Metoda IC aplikovaná na panelu Conrad



Obr. 47 Metoda IC aplikovaná na panelu Konarka

4.6 Simulace změny osvětlení FV panelu

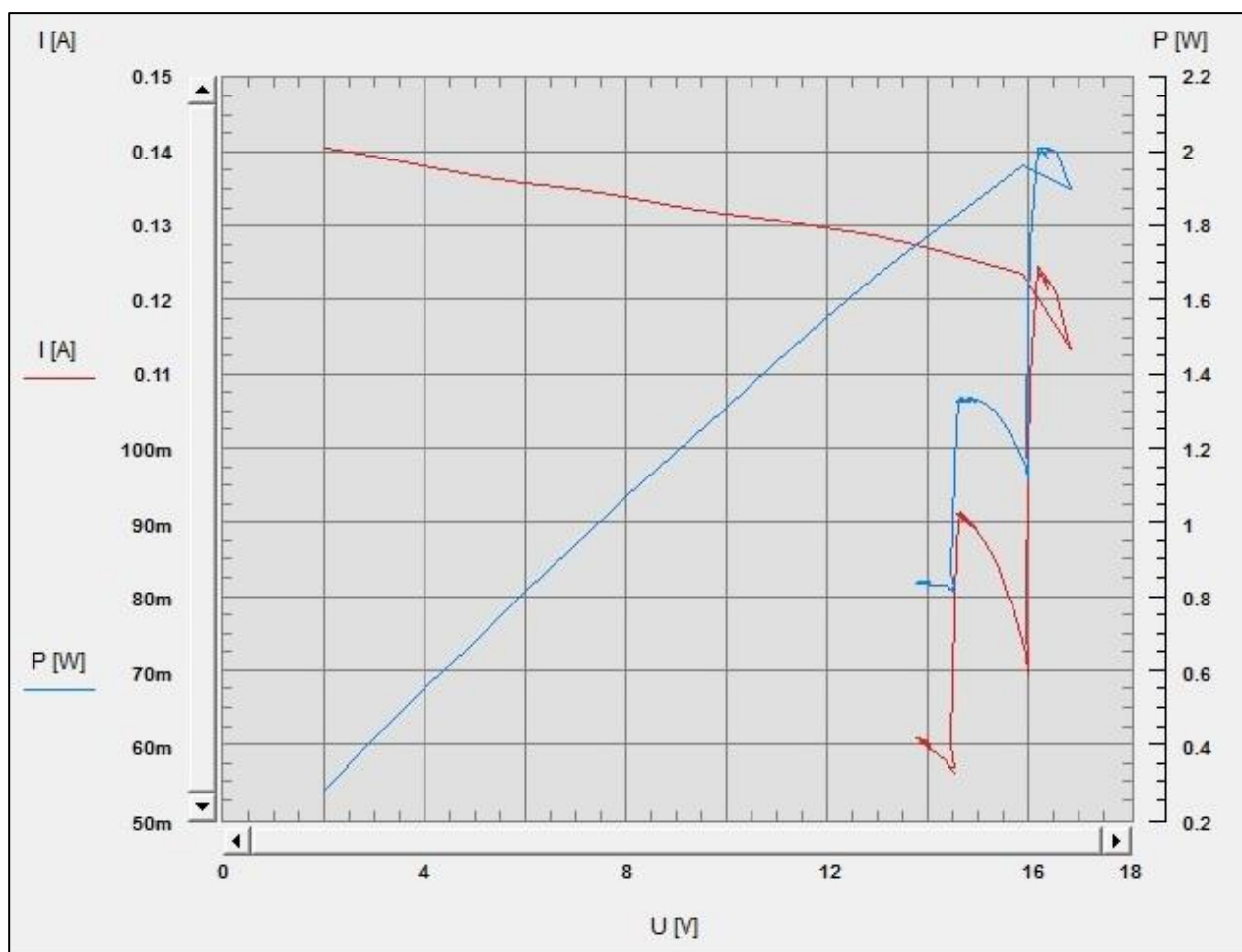
Po otestování obou programů, byly změnou intenzity osvětlení nasimulovány různé světelné podmínky, při kterých bylo možno sledovat, jak se algoritmy přizpůsobují její změně a i nadále vyhledávají bod MPP. Pro testování byl použit polykrystalický panel Conrad a intenzita osvětlení byla zaznamenána a následně snižována ve 3 krocích. Výsledné grafy obou metod jsou zobrazeny na obr. 48 a 49. V tomto případě byly pro ukázkou grafy převzaty přímo z prostředí VEE. Programy dobře reagovaly i na zvyšující se míru osvětlení, to však nebylo zaneseno do grafu, jelikož by poté byl těžko čitelný.



Obr. 48 Snižování intenzity osvětlení FVČ u metody P&O na panelu Conrad

Krok	E
	[W/m ²]
1.	290
2.	182
3.	106

Tab. 13 Intenzity osvětlení u metody P&O



Obr. 49 Snižování intenzity osvětlení FVČ u metody IC na panelu Conrad

Krok	E
	[W/m ²]
1.	720
2.	360
3.	200

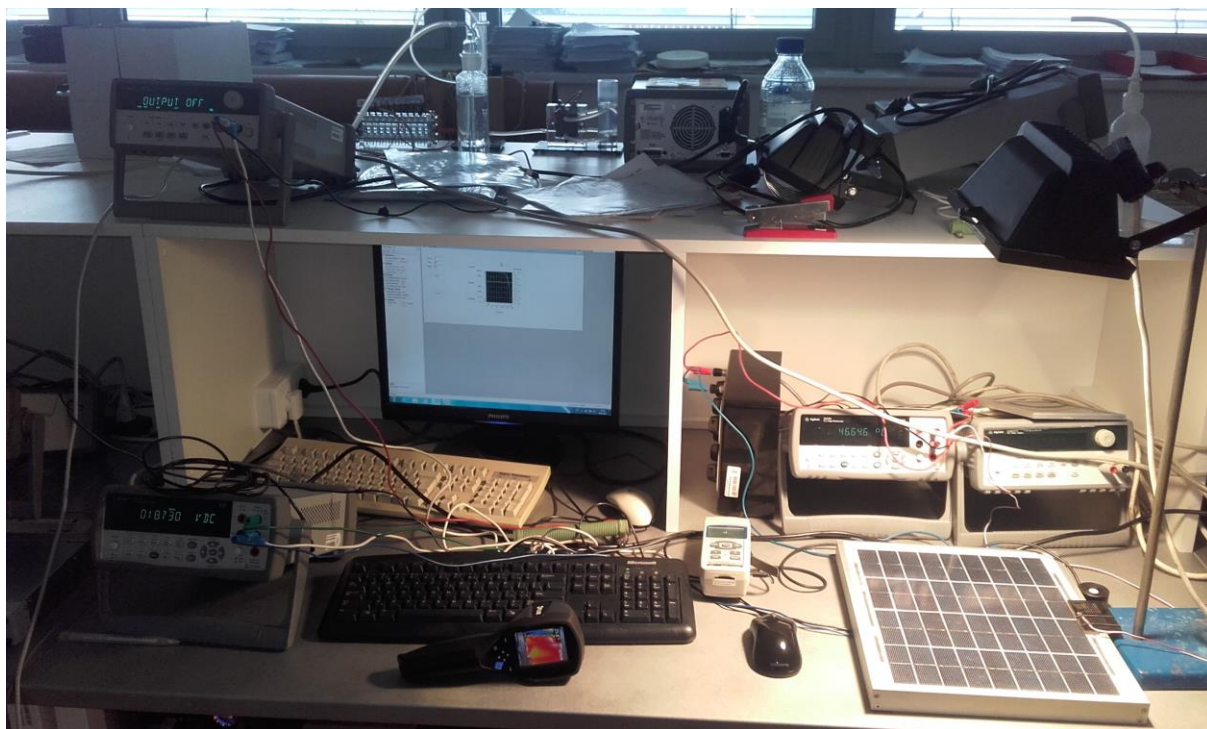
Tab. 14 Intenzity osvětlení u metody IC

4.7 Srovnání metod

V této kapitole jsou obě naprogramované metody srovnávány. Hodnoty osvětlení a přibližná teplota panelu při simulacích, jsou uvedeny v tabulkách 16, 19 a 22. Teplota během proměřování panelů byla měřena pomocí platinového odporového teploměru PT100 (v tabulce označena jako ϑ_{pt100}), který byl připevněn na jednom separovaném FV článku a umístěn vedle měřeného panelu. Následně na konci každého měření byla teplota změřena pomocí termokamery (v tabulce označena jako ϑ_{flir}). Všechny panely byly vystaveny stejným světelným podmínkám. Údaje z expozimetru se liší díky tomu, protože panely nemají stejnou velikost ani tvar a fotovoltaiický expozimetr byl umístěn vždy u okraje FV panelu, jak lze vidět na obr. 50 z laboratorního měření. Simulace každé metody trvala vždy 60 vteřin a byla provedena na každém typu panelu. Následně bylo v exportovaných datech z programu VEE vyhledáno výkonové maximum, které by mělo přibližně odpovídat bodu MPP.

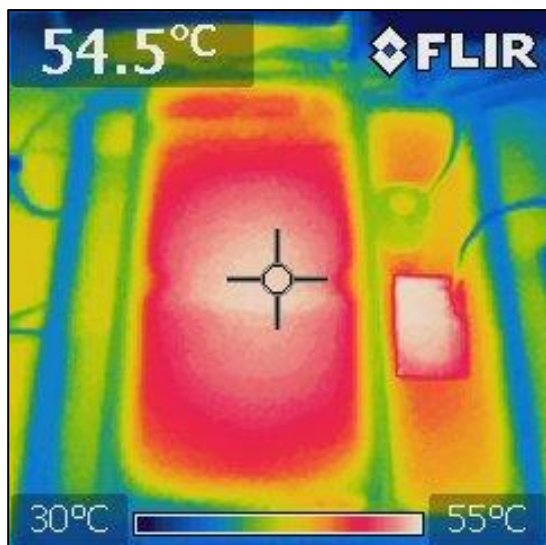
Přístroj	Typ	Výrobce
Polykrystalický FV článek	SPS10W-12V	Conrad Electronic SE
Monokrystalický FV článek	RS-M5 5Wp	Rich Solar
Amorfní FV článek	Series 20	Konarka
Zdroj 0-20VDC	E3644A	Agilent
Multimetr	34410A	Agilent
Rezistor	6R7 - 100W	-
Fotovoltaiický expozimetr	SPM-1116SD	LT Lutron
Termokamera	Z1	FLIR
Svítilno	Flood Light 751	Land lite

Tab. 15 Použité přístroje pro srovnávání metod



Obr. 50 Foto z laboratorního zapojení pro srovnávání metod

4.7.1 Monokrystalický panel Rich



Obr. 51 Termo snímek zatíženého článku Rich

Hodnoty při simulaci			
Monokrystalický FV panel	E	ϑ	
	-	[°C]	[°C]
	[W/m ²]	t_{pt100}	t_{flir}
	438	53,4	54,5

Tab. 16 Naměřené hodnoty teploty a osvětlení

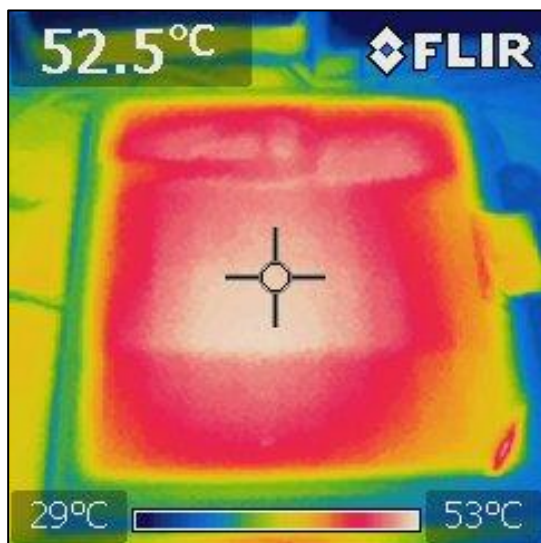
Monokrystalický panel Rich - IC				
Počet kroků pro dosažení P_{mpp}	t	U_{mpp}	I_{mpp}	P_{mpp}
[-]	[s]	[V]	[A]	[W]
15	13,54	15,66	0,09	1,48

Tab. 17 Tabulka dosaženého maxima metodou přírůstkové vodivosti pro panel Rich

Monokrystalický panel Rich - P&O				
Počet kroků pro dosažení P_{mpp}	t	U_{mpp}	I_{mpp}	P_{mpp}
[-]	[s]	[V]	[A]	[W]
35	30,23	16,34	0,09	1,50

Tab. 18 Tabulka dosaženého maxima metodou sledování změny výkonu pro panel Rich

4.7.2 Polykrystalický panel Conrad



Obr. 52 Termo snímek zatíženého článku Conrad

Hodnoty při simulaci			
Polykrystalický FV panel	E	ϑ	
	-	[°C]	[°C]
	[W/m ²]	t _{pt100}	t _{flir}
	399	47,5	52,5

Tab. 19 Naměřené hodnoty teploty a osvětlení

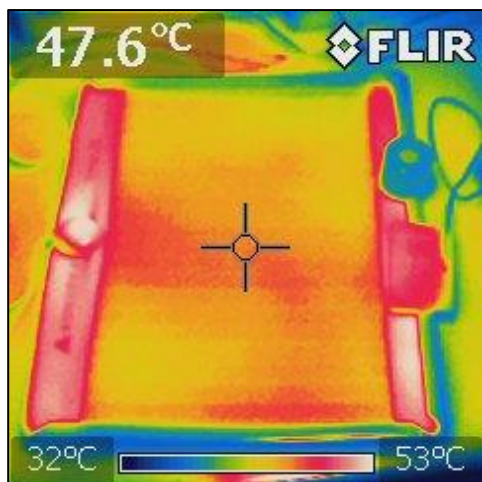
Polykrystalický panel Conrad - IC				
Počet kroků pro dosažení P _{mpp}	t	U _{mpp}	I _{mpp}	P _{mpp}
[-]	[s]	[V]	[A]	[W]
15	18,61	15,99	0,14	2,27

Tab. 20 Tabulka dosaženého maxima metodou přírůstkové vodivosti pro panel Conrad

Polykrystalický panel Conrad - P&O				
Počet kroků pro dosažení P _{mpp}	t	U _{mpp}	I _{mpp}	P _{mpp}
[-]	[s]	[V]	[A]	[W]
22	19,30	16,50	0,14	2,38

Tab. 21 Tabulka dosaženého maxima metodou sledování změny výkonu pro panel Conrad

4.7.3 Amorfnní panel Konarka



Obr. 53 Termo snímek zatíženého článku Konarka

Hodnoty při simulaci			
Amorfnní FV panel	E	ϑ	
	-	[°C]	[°C]
	[W/m ²]	t_{pt100}	t_{flir}
	338	45,5	47,6

Tab. 22 Naměřeného hodnoty teploty a osvětlení

Amorfnní panel Konarka - IC				
Počet kroků pro dosažení P_{mpp}	t	U_{mpp}	I_{mpp}	P_{mpp}
[-]	[s]	[V]	[A]	[W]
26	23,68	5,00	0,03	0,14

Tab. 23 Tabulka dosaženého maxima metodou přírůstkové vodivosti pro panel Konarka

Amorfnní panel Konarka - P&O				
Počet kroků pro dosažení P_{mpp}	t	U_{mpp}	I_{mpp}	P_{mpp}
[-]	[s]	[V]	[A]	[W]
6	6,66	5,19	0,03	0,14

Tab. 24 Tabulka dosaženého maxima metodou sledování změny výkonu pro panel Konarka

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámit se, naprogramovat a odzkoušet v laboratorním prostředí VUT metody pro dosažení maximálního bodu výkonu u fotovoltaických panelů. K dispozici byly tři panely bez bypassových diod, které jsou dnes běžně dostupné na trhu. Měření i odladění programů proběhlo v prostředí VEE bez větších komplikací. Byly naprogramovány celkem 3 programy. Jeden proměřoval V-A charakteristiku, druhý aplikoval k nalezení bodu MPP metodu Perturb and Observe a třetí metodu Incremental Conductance.

V kapitole 4.6 bylo dokázáno, že obě metody dobře zvládají simulaci reálného prostředí formou změny světelných podmínek dopadajících na FV panel. Programy by se daly upravit i pro hledání MPP u částečně zastíněného panelu s bypassovými diodami a to jejich kombinací. Nejprve by se proměřila V-A charakteristika, a na jejím základě, by se nastavilo napětí v oblasti vyššího maxima, okolo kterého by osciloval PB pomocí některého z programů. Tohle ovšem nebyl cíl této práce, ale možný námět na další diplomovou práci či výzkum v této oblasti.

Samotným zhodnocením MPP trackingu se zabývá kapitola 4.7, kde jsou vyneseny srovnávací tabulky s vyhledaným bodem maximálního výkonu za 60 vteřin působení dané metody. Obě metody byly aplikovány za stejných světelných podmínek a vždy byla metoda P&O měřena jako první a Incremental Conductance jako druhá. To vysvětluje taky jev ve srovnávacích tabulkách, proč dosahovala metoda IC menšího výkonu oproti metodě P&O. Slunce zde zastupovalo 500 W halogenové světlo, které značně nahřívalo panel, jelikož bylo umístěno cca 30cm nad jeho povrchem. Zvýšená teplota panelu pak snižovala jeho výstupní výkon. Můžeme si dovolit tvrdit, že čas potřebný k nalezení bodu P_{mpp} je v našem případě irelevantní a náhodný. Záleží vždy na V-A křivce v konkrétních podmínkách a na zvoleném napěťovém kroku u použité metody. Obě metody jsou tudíž stejně schopné dohledávat maximální výkon u fotovoltaických panelů, ačkoliv každá pracuje na jiném základu.

Výsledky této práce společně s vytvořenými programy v prostředí VEE, mohou posloužit nadále k laboratorní výuce odborných předmětů na VUT.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Solární elektrárna o výkonu 2,6kWp na klíč*, [online]. 2015 dostupné na World Wide Web:
<<https://www.solarniexperti.cz/solarni-systemy/fotovoltaika/fotovoltaicka-elektrarna-fve-o-vykonu-26-kwp-na-klic/>>
- [2] *Fotovoltaický panel IBC PolySol 260CS*, [online]. 2015 dostupné na World Wide Web:
<<https://www.solarniexperti.cz/solarni-systemy/fotovoltaika/fotovoltaicky-panel-ibc-poly-sol-260cs/>>
- [3] Svrček, M. *Solární energetické systémy pro bytový dům*, 2011, 53 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Radil
- [4] Volker Quasching: *Understanding Renewable Energy Systems*. Earthscan UK 2005, ISBN: 1-84407-136-7
- [5] *Způsoby využití slunce a slunečního záření* [online]. VŠB ČR, Dostupný z WWW: <http://rccv.vsb.cz/Island/docs/Zpusoby_vyuziti_slunecni_energie.pdf>.
- [6] Ladener, H. – Späte, F: *Solární zařízení*. Grada publishing, Praha 2003; 268 stran. ISBN: 80-247-0362-9.
- [7] Chocholáč, J. *Využití bypassových diod ve fotovoltaických panelech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011, 68 s. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing Petr Křivík Phd.
- [8] BANNERT, Petr. *Praktika z fotovoltaiky* [online]. 2008 Dostupné na: http://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/FY2BP_EkO/um/praktika
- [9] Masters, G. *Renewable and efficient electric power systems*, 2004, John Wiley & sons, 676 s. ISBN 0-471-28060-7
- [10] Kostka, T. *Fotovoltaičné systémy* [online]. 2015, Dostupné na
<http://www.outechhavirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ee/fvs_uvod.pdf>
- [11] *Ostrovní elektrárny*, [online] 2017, Dostupný z WWW.
<<http://ostrovni-elektrarny.tumblr.com/post/24832727622/jak%C3%BD-je-rozd%C3%AD-mezi-levn%C3%BDm-pwm-a-dra%C5%BE%C5%A1%C3%ADm-mppt>>.

